

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, 30–31 мая 2019 г.)

В двух томах
Том 2

Издательство
Пермского национального исследовательского
политехнического университета
2019

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*

Секция III
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА

П.А. Харченко, С.В. Горячев

РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАЧТЫ БЕЗЛОПАСТНОГО ВЕТРОГЕНЕРАТОРА

Представлены аспекты конструирования мачты для безлопастного ветрового генератора в целях повышения эффективности устройства. Рассмотрена информация о безлопастном генераторе: устройство, конструкция, принцип действия, новизна.

Ключевые слова: ветроэнергетика, энергия, устройство, генератор, мачта, безлопастной ветрогенератор.

P.A. Kharchenko, S.V. Goryachev

DEVELOPMENT AND JUSTIFICATION OF THE EFFICIENCY OF THE MACHINE OF BLOCELESS GENERATOR

This article discusses aspects of mast design for a windless wind generator in order to improve the efficiency of the device. Considered information about the generator: the device, design, principle of operation, novelty.

Keywords: wind power, energy, device, generator, mast, without lobed aggregate.

Безлопастные ветровые генераторы относятся к оборудованию электроэнергетики, они являются одним из наиболее эффективных и выгодных устройств для получения электрической энергии из энергии ветра и могут использоваться как на крупных ветровых электрических станциях, так и для снабжения отдельно взятых районов, населенных пунктов и частных владений энергией [1, 2].

Работа генератора отличается от традиционных установок (лопастные генераторы), она происходит за счет вихрей (вихревых цепочек), которые образуются в результате обтекания жидкости или газа протяженных цилиндрических тел с продольной осью, перпендикулярной направлению движения сплошной среды. Отрыв вихрей происходит с обеих сторон тела поочередно; после срыва вихри образуют две цепочки с задней стороны обтекаемого тела, направление вращения вихрей в одной цепочке противоположно направлению в другой. Вихревая цепочка называется дорожкой Кармана (рис. 1).

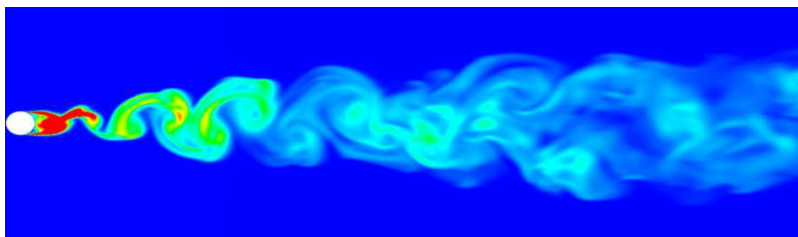


Рис. 1. Дорожка Кармана

Разработанный нами безлопастной генератор (рис. 2) состоит из верхней и нижней частей. В верхней части установлены мачта и стержень. В нижней части имеется система генерации и фундамент.

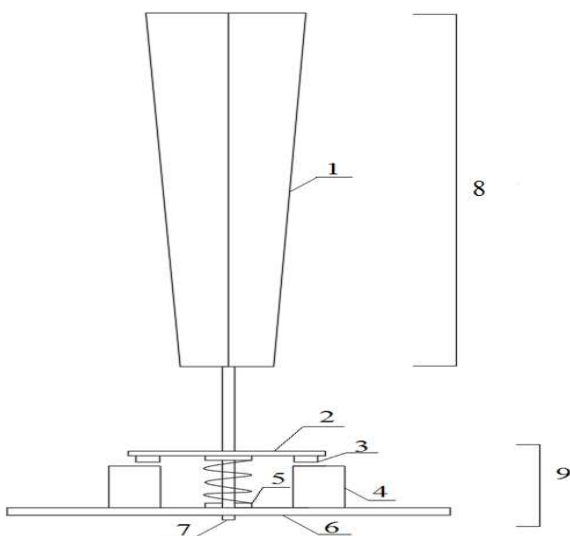
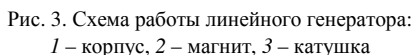


Рис. 2. Схема безлопастного ветрового генератора: 1 – мачта, 2 – текстолит, 3 – неодимовый магнит, 4 – катушка, 5 – пружина, 6 – фундамент, 7 – стержень, 8 – верхняя часть, 9 – нижняя часть

Мачта выполняется принципиально из легких материалов, в нашем устройстве мачта выполнена из стекловолокна, поскольку у данного материала имеются такие достоинства, как высокий уровень прочности, устойчивость к термообработке, экологичность, негорючесть, способность сохранять форму, дешевизна. Стержень, на который закреплена мачта, стальной.

Принцип действия генератора основывается на работе линейного генератора. Как известно, работа линейного генератора примитивна и гениальна одновременно. Например, имеется корпус, магнит, катушка (рис. 3). Магнит 2, находящийся в корпусе 1, при движении или соприкосновении с электромагнитной катушкой 3 производит переменный ток.



Ветровой поток, двигающийся в сторону мачты 1, заставляет ее совершать колебательные движения. Колебания по стержню передаются на текстолитовое кольцо. При этом неодимовые магниты 3, которые закреплены на текстолите 2 параллельно друг другу, совершают движения, взаимодействуя с катушками 4; в свою очередь, катушки установлены на фундаменте в диаметрально противоположных сторонах.

6

Разработка и обоснование эффективности мачты безлопастного ветрогенератора. Мачта устройства имеет форму перевернутого конуса (рис. 4).



Рис. 4. Мачта

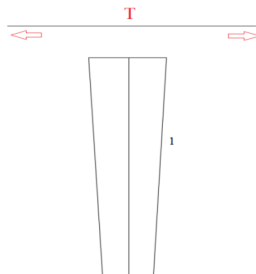


Рис. 5. Период колебаний: T – мачта

Конструктивный расчет:

- а) период колебаний T примерно 0,5 с (рис. 5);
- б) расчет частоты колебаний (число колебаний, совершаемых телом в единицу времени) определяется по формуле

$$V = \frac{1}{T},$$

$$V = \frac{1}{0,5} = 2 \text{ Гц},$$

где T – период колебаний;

в) расчет гармонических колебаний:

$$x = A \cos(\omega t + \alpha),$$

где A – амплитуда колебаний, $A = 2$ см; ω – круговая (циклическая) частота, $\omega = 2\pi V = 2 \cdot 3,14 \cdot 2 = 12,56$ рад/с; t – время; α – начальная фаза $x = 2,5 \cos(12,56 \cdot 0,5 + 1) = 1,11$ м.

На сегодня мачта разрабатывается в виде конуса перевернутой формы с установленными пластинами для большего охвата ветрового потока (рис. 6).

Полная ветровая нагрузка определяется формулой [1]

$$F = \frac{S \rho V_b^2}{g},$$

где ρ – плотность воздуха, $\rho = 1,29$ кг/м³; S – площадь мачты, м²; V_b – скорость потока воздуха, м/с.

$$F = \frac{2 \cdot 1,29 \cdot 15^2}{9,8} = 59,2 \text{ Н}.$$

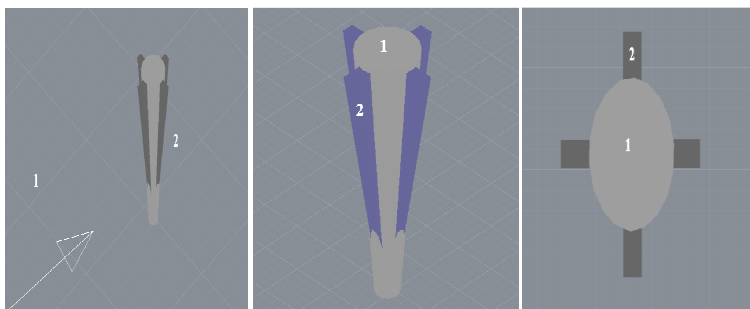


Рис. 6. Форма мачты: *а* – мачта (1 – поток ветра, 2 – мачта); *б* – мачта (1 – основание, 2 – пластины); *в* – вид сверху (1 – основание, 2 – пластины)

Мощность, получаемая на генераторе [2],

$$N = C_x \frac{\rho S}{2} (V_B - V_{\Pi})^2 V_{\Pi} = \eta N_B.$$

Мощность, развиваемая мачтой, Вт, определяется как кинетическая энергия ветра, действующая в единицу времени, с учетом коэффициента ее использования [3]:

$$P_M = \rho \frac{S}{2} V^3 \eta_{\text{КИЭВ}},$$

где C_x – коэффициент использования энергии ветра; V – скорость потока; ρ – плотность;

$$P_M = 1,29 \cdot \frac{2}{2} \cdot 15^3 \cdot 0,485 = 2,1 \text{ кВт};$$

1. Период колебаний T примерно 0,2 с.

2. Частота колебаний 5 Гц.

Основные нагрузки: собственный вес сооружения и находящиеся на нем или подвешенные к телу устройства; составляющие стяжения сети, поддерживаемой мачтой; силовые воздействия, вызванные низшей или наивысшей температурой.

Разработав конструкцию генератора, можно сделать вывод, что внедрение предложенной формы достаточно эффективно, поскольку благодаря новой форме ветрогенератор способен охватывать поток ветра еще большей площади, за счет чего будет вырабатываться большее количество электрической энергии.

Библиографический список

1. Быстрицкий Г.Ф. Основы энергетики. – М.: Инфра-М, 2005. – 278 с.
2. Харченко П.А. Перспективы ветроэнергетики // Синергия Наук: междунар. науч. журн. – Июнь 2018. – № 24.
3. Горячев С.В., Харченко П.А. Использование безопасного генератора в ветроэнергетике // Энергосбережение и водоподготовка. – 2019. – № 1(117).
4. Горячев С.В., Тимофеев В.И., Панявин М.В. Перспектива развития возобновляемых источников энергии на примере ветроэнергетической установки нового поколения Vortex // Успехи современной науки. – 2017. – Т. 1, № 12. – С. 119–123.
5. Горячев С.В., Харченко П.А. Использование безопасного генератора в ветроэнергетике // Сборник ОГУ. – Оренбург: Изд-во ОГУ, 2018.

Сведения об авторах

Харченко Павел Алексеевич – студент Оренбургского государственного университета, гр. 15ТТ(ба)ЭоП, г. Оренбург, e-mail: pasha97_06@mail.ru

Горячев Сергей Вениаминович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электро- и теплоэнергетика» Оренбургского государственного университета, г. Оренбург, e-mail: gsv_brent@mail.ru

Р.М. Сабитов, Н.Г. Семенова

СИСТЕМА ОСВЕЩЕНИЯ ПАРКОВОЙ ЗОНЫ

Спроектирована система освещения парковой зоны. Представлены нормативные показатели освещенности для различных зон парковой зоны. Светотехнический расчет выполнен с помощью точечного метода расчета освещенности. Распределение освещенности на различных площадках парковой зоны смоделировано с применением программы DIALux. Проведен сравнительный анализ полученных результатов.

Ключевые слова: наружное освещение, светотехнический расчет, точечный метод, нормы освещенности, парковая зона.

R.M. Sabitov, N.G. Semenova

PARK AREA LIGHTING SYSTEM

The article designed the lighting system of the park area. Presents regulatory indicators of illumination for different areas of the park area. Lighting calculation, performed using the point method of calculating the illumination. The distribution of illumination at various sites in the park area is modeled using the DIALux. Comparative analysis of the results obtained.

Keywords: outdoor lighting, lighting calculation, point method, standards of illumination, park area.

Современные сети наружного освещения являются достаточно энергоемкими объектами. В работе [1] отмечено, что траты на электроэнергию в сетях наружного освещения населенных пунктов составляют 30 % от всех затрат на освещение.

Согласно Федеральному закону [2], вопросы энергосбережения и повышения энергетической эффективности являются приоритетными направлениями развития электроэнергетики Российской Федерации, поэтому разработка энергоэффективных систем управления наружным освещением парковой зоны является актуальной и значимой задачей.

Одним из этапов разработки энергоэффективной системы управления наружным освещением парковой зоны является составление математической модели наружного освещения (НО). Математическая модель НО парковой зоны основана на светотехническом расчете,

выполненном с помощью точечного метода расчета освещенности. В качестве примера в данной работе рассмотрена сеть НО парковой зоны детского сада, расположенного в 18-м микрорайоне г. Оренбурга.

Характеристика сети НО, основные нормы освещенности. Для освещения территории парковой зоны выбраны светодиодные светильники марки ДКУ62-100-001 Champion 750 производства ОАО «АСТЗ». Мощность светильников 100 Вт, световой поток 11 500 лм [3]. Высота установки светильника 9 м над уровнем земли. Места установки светильников выбраны с опорой на необходимость освещения всех центральных и боковых аллей парка, а также с учетом условия: для освещения одной игровой площадки используется один светильник.

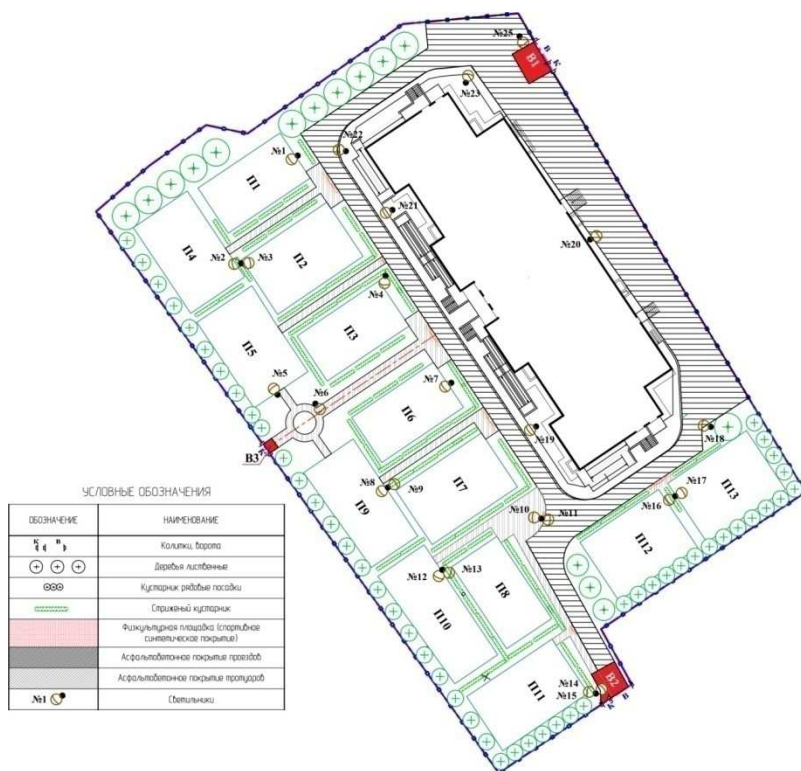


Рис. 1. Предварительная расстановка осветительных приборов по территории парка

Основные нормы освещенности для различных зон парковой зоны детского сада указаны в п. 7.34 табл. 14 СНиП 23-05-95 «Естественное и искусственное освещение» [4] и п. 7.75 табл. 26 СП 52.13330.2011 «Естественное и искусственное освещение» [5].

Основные освещаемые зоны и нормы освещенности, предъявляемые к ним, представлены в табл. 1. Предварительная расстановка осветительных приборов по территории парковой зоны детского сада представлена на рис. 1.

Таблица 1

Основные освещаемые зоны и нормы освещенности

Обозначение	Наименование	СНиП 23	СП 52	Макс. норм. показатели
П1–П13	Игровые площадки	10 лк	10 лк и $E_{\min}/E_{\text{ср}} = 0,3$	10 лк и $E_{\min}/E_{\text{ср}} = 0,3$
В1–В2	Главные входы	4 лк	6 лк и $E_{\min}/E_{\text{ср}} = 0,2$	6 лк и $E_{\min}/E_{\text{ср}} = 0,2$
В3	Вспомогательные входы	1 лк	1 лк и $E_{\min}/E_{\text{ср}} = 0,1$	1 лк и $E_{\min}/E_{\text{ср}} = 0,1$
	Центральные аллеи	2 лк	–	2 лк
	Боковые аллеи	1 лк	1 лк и $E_{\min}/E_{\text{ср}} = 0,1$	1 лк и $E_{\min}/E_{\text{ср}} = 0,1$

Светотехнический расчет. Согласно точечному методу расчета, освещенность считается для каждой точки рассчитываемой поверхности относительно всех источников освещения. Точность расчета напрямую связана с количеством определенных точек, в связи с чем для повышения точности расчета воспользуемся программой для проектирования освещения интерьеров и улиц DIALux.

Подробнее рассмотрим расчет освещенности игровой площадки, обозначенной на рис. 1 как зона П5. Зону П5 освещает светильник № 5. Также рядом расположены светильники № 2, № 3, освещающие зоны П4, П2, и светильник № 6, освещающий одну из аллей парка. Необходимо определить действительную расчетную освещенность от перечисленных ранее светильников в точке А, гипотетически принятой нами как наиболее удаленную от источников света. Расстояния от учитываемых светильников до точки А представлены на рис. 2.

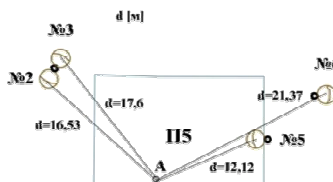


Рис. 2. Расстояния от учитываемых светильников до точки А

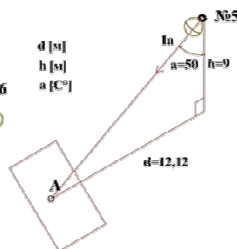


Рис. 3. Положение светильника № 5, относительно точки А

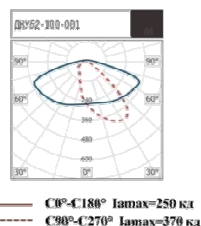


Рис. 4. Фотометрическая диаграмма светильника

Освещенность от светильника № 5 в расчетной точке А выражается законом квадратов расстояний. Значения, используемые в расчете, представлены на рис. 3:

$$E_{\text{№ 5}} = \frac{I_a \cos^3 a}{h^2},$$

где I_a – сила света, согласно фотометрической диаграмме (рис. 4) по каталожным данным светильника, $I_a = 250$ кд [3]; $a = 50^\circ$ согласно рис. 9.2 работы [6] при $h = 2$ м, $d = 12,12$ м;

$$E_{\text{№ 5}} = \frac{250 \cdot 0,899}{9^2} = 2,775 \text{ лк.}$$

Аналогичным образом определяется освещенность в расчетной точке А от остальных светильников. Используя метод наложения освещенности, получаем $\sum E_A = 9$ лк.

Определим действительную расчетную освещенность в рассматриваемой точке А:

$$E_A = \mu \sum_A E K,$$

где μ – коэффициент добавочной освещенности, $\mu = 1,05$; K – коэффициент запаса для светодиодных светильников, $K = 1,1$,

$$E_A = 1,05 \cdot 10 \cdot 1,1 = 10,395 \text{ лк.}$$

Результаты расчета освещенности зоны П5 посредством программы DIALux представлены на рис. 5, они совпадают с результатом выполненного ранее расчета. Таким образом, освещенность точки А зоны П5 соответствует нормативному значению освещенности 10 лк.

Расчет освещенности оставшихся зон парковой зоны произведен в DIALux. Расчет всей территории парковой зоны (изолинии) представлен на рис. 6. Средняя освещенность площадок и отношение минимальной освещенности к средней сведены в табл. 2.

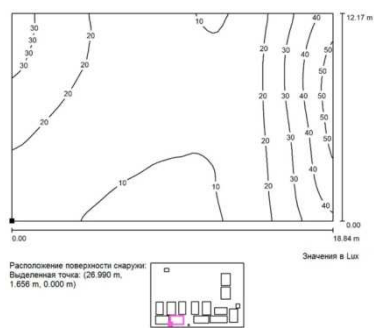


Рис. 5. Результаты расчета площадки № 5 посредством программы DIALux

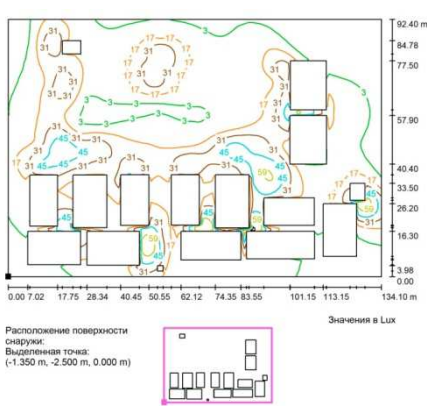


Рис. 6. Расчет всей территории парка (изолинии)

Таблица 2

Освещенность зон

Зона	$E_{ср},$ лк	$E_{min}/E_{ср},$ лк	Зона	$E_{ср},$ лк	$E_{min}/E_{ср},$ лк	$E_{ср}$ (норм), лк	$E_{min}/E_{ср}$ (норм), лк
П1	22	0,488	П10	31	0,32	10	0,3
П2	21	0,353	П11	20	0,31		
П3	31	0,315	П12	22	0,3		
П4	20	0,3	П13	27	0,3		
П5	19	0,425					
П6	26	0,539					
П7	33	0,497					
П8	21	0,3					
П9	17	0,3					
В1	27	0,431	В2	45	0,589	6	0,2
В3	27	0,819				1	0,1

Согласно результатам светотехнического расчета посредством точечного метода расчета и программы DIALux, предварительно выбранные места расположения светильников обеспечивают уровень освещенности, соответствующий нормам по СНиП 23-05-95, СП 52.13330.2011.

Библиографический список

1. Сапронов А.А., Никуличев А.Ю. Энергоэффективная система управления муниципальным освещением [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.energosoвет.ru/stat573.html>
2. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: Федер. закон № 261-ФЗ от 23.11.2009.
3. Каталог продукции ОАО «АСТЗ» [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.astz.ru/ru/production/catalogs/>
4. СНиП 23-05–95. Естественное и искусственное освещение.
5. СП 52.13330.2011. Естественное и искусственное освещение.
6. Айзенберг Ю.Б. Справочная книга по светотехнике: справочные материалы. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 472 с.

Сведения об авторах

Сабитов Руслан Маратович – магистрант Оренбургского государственного университета, гр. 18ЭЭ(м)АЭСК, г. Оренбург, e-mail: sabitovrm96@gmail.com

Семенова Наталья Геннадьевна – кандидат технических наук, доктор педагогических наук, профессор кафедры «Автоматизированный электропривод, электромеханика и электротехника» Оренбургского государственного университета, г. Оренбург, e-mail: tomsk@house.osu.ru

В.М. Нелюбов, С.Н. Матвейкин

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК
ГАЗОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО ЗАВОДА**

Проведен анализ научно-технической литературы по тематике газотурбинных установок и их автоматизации, проектирование газотурбинной установки для повышения надежности системы электроснабжения технологических установок газоперерабатывающего завода в целом, а также рассмотрены особенности проектирования ГТУ на ГПЗ в частности.

Ключевые слова: газотурбинная установка, электростанция, ГТУ, автоматизация, проектирование, ГТЭС, нагрузки, ГПЗ.

V.M. Nelyubov, S.N. Matveikin

**USE OF A GAS TURBINE INSTALLATION
FOR THE EFFECTIVENESS OF THE RELIABILITY
OF THE ELECTRIC POWER SUPPLY SYSTEM
OF THE TECHNICAL PROCESSING PLANT**

This article describes the analysis of scientific and technical literature on the subject of gas turbine installations and their automation, the design of a gas turbine installation to improve the reliability of the power supply system of technological installations of the gas processing plant as a whole, as well as the design features of GTP at the GPP in particular.

Keywords: gas turbine plant, power station, GTP, automatization, design, GTES, load, GPF.

Газотурбинная установка (ГТУ) – это энергетическая установка, конструктивно объединяющая в себе газовую турбину, электрический генератор, газозоудный тракт, системы управления, а также пусковое устройство, компрессор, теплообменный аппарат или котел-утилизатор для подогрева сетевой воды для промышленного снабжения или пара для поступления на паровую турбину, главной целью взаимодействия компонентов которой является выработка электроэнергии путем сжигания топлива. ГТУ имеют единичную электрическую мощность от 20 кВт (микротурбины) и до нескольких сотен

мегаватт. Самой мощной газовой турбиной в мире с полной мощностью 450 МВт является Siemens SGT5-8000H.

Актуальность работы заключается в том, что введение третьего независимого источника электроэнергии – ГТУ – на предприятии ГПЗ является необходимой мерой для обеспечения надежности потребителей особой группы 1-й категории по ПУЭ. Применение ГТУ также позволит путем снижения затрат на энергоносители и эффективного использования топливного газа увеличить доход предприятия, что для ПАО «Газпром» является главной задачей. Стоит отметить, что возведение ГТУ способствует улучшению экологической обстановки на предприятии.

Цели данной работы – спроектировать газотурбинную установку и проработать ее внедрение на ГПЗ, автоматизировать работу ГТУ для повышения надежности системы электроснабжения технологических установок газоперерабатывающего завода (ГПЗ).

Анализ литературы по газотурбинным установкам показал, что на сегодня исследованы газотурбинные установки в целом (конструкции, разновидности, особенности, достоинства и недостатки) и вопросы по их внедрению в энергетике, автономное использование для питания удаленных потребителей и тому подобное, также газотурбинные установки на базе конвертированных авиационных двигателей, но автоматизация работы газотурбинной установки исследована недостаточно.

На сегодняшний день определены две наиболее актуальные проблемы в сфере газотурбинных установок:

1. Определение места включения генератора ГТУ в существующую схему электроснабжения предприятия с наибольшей эффективностью и наименьшими затратами на ее реконструкцию.

2. Повышение энергоэффективности ГТУ, заключающееся в том, что при уменьшении загрузки генератора ГТУ до 50 % электрический КПД газовой турбины значительно снижается, а также происходит повышенный износ оборудования.

Первая проблема не представляет особого исследовательского интереса и решается в каждом случае по-своему, а вторая проблема имеет несколько решений:

1. Комбинирование ГТУ с установками охлаждения воды и воздуха.
2. Применение инновационных газотурбинных технологий.
3. Автоматизация работы ГТУ.

Предложен вариант включения ГТУ в существующую схему электроснабжения предприятия с наибольшей эффективностью и наименьшими затратами на ее реконструкцию, разработан и составлен алгоритм работы ГТУ, который обеспечивает безаварийную и удобную автоматизированную эксплуатацию ГТУ и регулирование нагрузки с целью загрузки ГТУ наиболее близко к 100 % путем одновременной согласованной коммутации секционных выключателей и вводных выключателей фидеров энергосистемы.

По схеме электроснабжения технологических установок ГПЗ, изображенной на рисунке, был выполнен анализ потребителей щитов Т-11, Т-12 и Т-13, которые планируется запитывать от проектируемой ГТУ. Он показал, что некоторые высоковольтные потребители напряжением 6 кВ относятся к потребителям особой группы 1-й категории, а остальные потребители, представляющие собой сумму высоковольтной двигательной нагрузки напряжением 6 кВ, и подключенные через цеховые трансформаторы низковольтные щиты Т21–Т24 относятся к потребителям 1-й категории.

Как видно из схемы, для обеспечения необходимого режима работы подключение осуществляется ко 2-й секции каждого щита после вводных щитов «ГазпромЭнерго», при этом кабели генераторного напряжения КТЭЦ остаются подключенными к вводным щитам «ГазпромЭнерго», а кабели от них под напряжением в щитах с целью резервирования.

В наилучшем режиме (нормальном режиме работы) ГТУ питает только вторые секции щитов, а в наихудшем (аварийном) режиме – щиты целиком, но это возможно только с условием отключения менее значимых потребителей автоматической частотной разгрузкой. Для этих режимов выполнен расчет нагрузок с учетом потерь мощности в элементах системы электроснабжения.

В результате расчета нагрузок щитов Т11–Т13 была определена суммарная полная мощность ГТУ с учетом потерь для нескольких режимов работы ГТУ:

1. В нормальном режиме работы, когда ГТУ питает только одну секцию щитов Т11–Т13, $S_{\text{нормГТУ}} = 12\,773,568$ кВА.

2. В аварийном режиме работы без отключения АЧРом части нагрузки, когда ГТУ питает две секции щитов, $S_{\text{авГТУ}} = 32\,454,152$ кВА.

3. В аварийном режиме работы с отключением АЧРом менее значимых потребителей, когда ГТУ питает две секции не полностью, $S_{\text{авАЧР}} = 27\,965,627$ кВА.

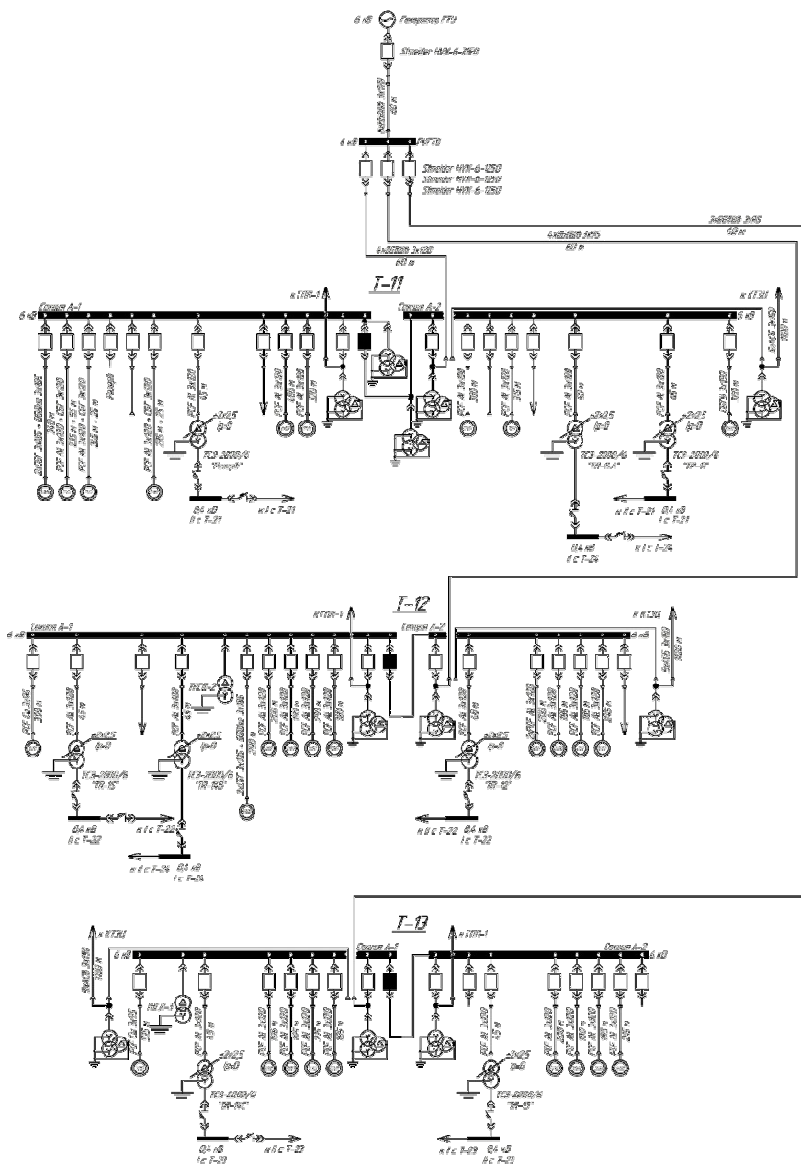


Рис. Однолинейная схема подключения ГТУ

На основании выполненного расчета нагрузок были выбраны и проверены газотурбинная установка ГТЭС-22 и побочное оборудование системы электроснабжения. Проверка на перегрузку показала, что выбранная газотурбинная электростанция будет работать без систематической перегрузки в нормальном режиме работы, а в аварийном будет испытывать аварийную перегрузку и сможет ее выдержать только при отключении АЧРом менее значимых потребителей.

Газотурбинная установка была спроектирована таким образом, чтобы в дальнейшем можно было бы реализовать задуманное регулирование нагрузки с целью загрузки ГТУ наиболее близко к 100 % путем одновременной согласованной коммутации секционных выключателей и вводных выключателей фидеров энергосистемы.

После окончательного выбора ГТЭС определяются с разновидностью конструкции газотурбинной установки. Предполагается, что ГТУ будет иметь блочно-модульную конструкцию во взрывозащищенном исполнении.

В качестве топлива предполагается использование побочного продукта – топливного газа, который в настоящее время утилизируется, а после возведения ГТУ путем сжигания будет приносить пользу в виде электроэнергии. Нельзя не отметить также то, что путем прохождения отработанного газа через систему фильтрации ГТЭС будет улучшена экологическая обстановка на предприятии.

Планируется установить ГТЭС около подстанции Р-1, в которой располагаются потребители ГТЭС.

Питание потребителей будет обеспечено с использованием кабельных линий через распределительное устройство газотурбинной установки. Топливный газ на турбину будет поставляться по газопроводу с ближайшей точки отбора.

В дальнейшем планируется разработать алгоритм автоматизированной работы выбранной ГТУ, а затем реализовать разработанный алгоритм на созданной в MatLab имитационной модели, включающей в себя газотурбинную установку и высоковольтные щиты Т11–13.

Библиографический список

1. Овсянник А.В., Шаповалов А.В., Болотин В.В. Газотурбинные установки на базе конвертированных авиационных двигателей // Вестник Гомел. гос. техн. ун-та им. П.О. Сухого. – 2013. – № 2. – С. 79–85.

2. Долотовский И.В., Ларин Е.А., Долотовская Н.В. Повышение энергоэффективности газотурбинных установок // Вестник Саратов. гос. техн. ун-та им. Ю.А. Гагарина. – 2014. – № 1(75). – С. 138–142.
3. Ларин Е.А., Рожнов С.П., Шелудько Л.П. Применение инновационных газотурбинных технологий для повышения энергоэффективности Саратовского теплового узла // Новости теплоснабжения. – 2015. – № 01(173).
4. Правила устройства электроустановок. – 6 и 7 изд., с изм. и доп. по состоянию на 1 мая 2012 г. – М.: КНОРУС, 2012. – 488 с.
5. РД 51-00158623-08–95. Категорийность электроприемников промышленных объектов газовой промышленности. Руководящий нормативный документ. Введ 1995–07–01.
6. Мукосеев Ю.Л. Электроснабжение промышленных предприятий: учеб. для вузов. – М.: Энергия, 1973. – 584 с.
7. Кабышев А.В., Обухов С.Г. Расчет и проектирование систем электроснабжения: Справочные материалы по электрооборудованию: учеб. пособие / Том. политехн. ун-т. – Томск, 2005. – 168 с.
8. Справочник по электроснабжению промышленных предприятий. Промышленные электрические сети / под общ. ред. А.А. Федорова и Г.В. Сербиновского. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1980. – 576 с.
9. ГОСТ 28173–89 (МЭК 34-1–83). Машины электрические вращающиеся. – М., 1991.
10. Газотурбинные электростанции на базе газовых турбин мощностью 22/25 МВт: каталог / АО «РЭП Холдинг». – 2019.

Сведения об авторах

Нелюбов Виктор Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электро- и теплоэнергетика» Оренбургского государственного университета, г. Оренбург, e-mail: vikminel@mail.ru

Матвейкин Сергей Николаевич – магистрант Оренбургского государственного университета, гр. 18ЭЭ(м)АЭСК, г. Оренбург, e-mail: s_matveikin@mail.ru

В.А. Лобанов, К.Р. Валиуллин

**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
УЧАСТКА ЭНЕРГОСИСТЕМЫ В СРЕДЕ
МОДЕЛИРОВАНИЯ MATLAB/SIMULINK**

Рассмотрена возможность имитационного моделирования электроэнергетической системы в среде моделирования MatLab/Simulink.

Ключевые слова: имитационное моделирование, модель, MatLab, Simulink.

V.A. Lobanov, K.R. Valiullin

**IMITATION MODELING OF THE POWER
ENERGY SYSTEM IN THE ENVIRONMENT
OF MODELING MATLAB SIMULINK**

This article discusses the possibility of simulation modeling of the electric power system in the MatLab/Simulink simulation environment.

Keywords: simulation modeling, model, MatLab, Simulink.

Имитационным моделированием называется метод исследования, при котором реальный объект заменяется моделью, с достаточной точностью описывающей рассматриваемую систему. Имитационная модель является логико-математическим описанием рассматриваемого объекта, которое может быть использовано для экспериментирования на ЭВМ с целью анализа и оценки функционирования объекта в различных режимах работы, при различных внешних воздействиях и любых сочетаниях свойств рассматриваемого объекта [1].

Достоинства имитационного моделирования в сфере электроэнергетики отмечаются во многих исследованиях. Например, в работе [2] рассмотрено моделирование режимов работы системы электропитания железных дорог. Авторы статьи отмечают возможность развертывания процесса функционирования системы во времени с имитацией элементарных событий и сохранением логики их взаимодействия. При моделировании сельских распределительных сетей 10/0,4 кВ в работе [3] авторы отмечают такие достоинства модели, как автоматический учет всех связей и соотношений всех элементов

системы; получение результатов моделирования в форме, аналогичной результатам при испытаниях реальных схем, что значительно сокращает время, требуемое для анализа полученных данных; а также возможность исследования работы схем в условиях действия различных мешающих факторов, помех.

Из-за риска порчи электроэнергетического оборудования для его проверки в системе невозможно искусственно создать аварийный режим. Решением этой проблемы является использование имитационной модели. Данный метод активно используется для проверки работоспособности цифровых токовых защит с помощью созданной имитационной модели в среде моделирования MatLab/Simulink [4].

В работе по исследованию единой электроэнергетической системы в среде Simulink [5] говорится о значительном сокращении времени, а также о существенном упрощении задачи при использовании имитационных моделей, что очень важно в современном темпе развития электроэнергетики.

Помимо перечисленных ранее достоинств имитационного моделирования также можно отметить невысокую стоимость и универсальность данного метода. Как и любой метод, имитационное моделирование не лишено недостатков. К ним относится наличие погрешности, необходимость проверки модели, отсутствие определенных стандартов и ГОСТов.

В данной статье рассматривается имитационная модель участка ЭЭС, созданная в среде моделирования MatLab/Simulink. Рассматриваемый участок состоит из воздушных линий электропередач (ВЛЭП), подстанций с установленными на них трансформаторами, а также шин энергосистемы. Однолинейная схема рассматриваемого участка ЭЭС представлена на рис. 1.

Для моделирования в среде MatLab/Simulink был произведен расчет параметров линии, трансформаторов и эквивалента энергосистемы. Элементы заменяются блоками из библиотеки приложения. Полученные данные в результате расчета вносятся в параметры соответствующих блоков. Расчет параметров элементов ЭЭС производится согласно работе [6]. В связи с тем, что согласно принятым методикам расчета параметров схем замещения питающей системы активным сопротивлением питающей системы пренебрегают ввиду его малости, отношение реактивного и активного сопротивлений (X/R ratio) в модели принимаем равным бесконечности.

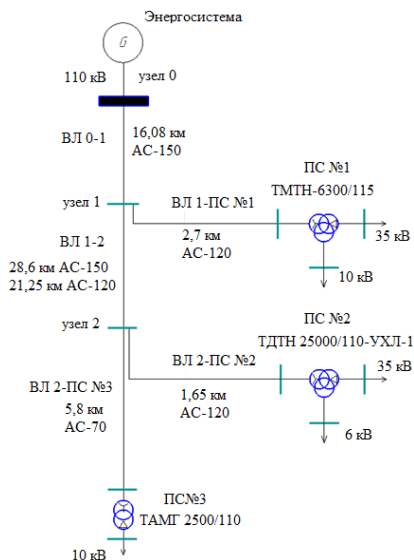


Рис. 1. Однолинейная схема ЭЭС

Согласно работе [6], линии электропередач напряжением 110–220 кВ и длиной до 400 км с достаточной точностью моделируются П-образной схемой замещения. В среде Simulink был выбран блок 3phase PI Section Line, схема замещения которого соответствует П-образной схеме замещения воздушной линии.

В качестве параметров блока задаются удельные сопротивления, индуктивности и емкости линии по прямой и нулевой последовательности, а также длина линии электропередач. Данные параметры были рассчитаны исходя из справочных данных [7] и представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры схемы замещения воздушных линий

Наименование линии	ВЛ 0-1	ВЛ 1-2	ВЛ 1-ПС № 1	ВЛ 2-ПС № 2	ВЛ 2-ПС № 3
Длина линии, км	16,08	28,6; 21,25	2,7	1,65	5,8
Активное сопротивление прямой и нулевой последовательности, Ом/км	0,198/0,348	0,22/0,37	0,249/0,399	0,249/0,399	0,428/0,578
Индуктивность прямой и нулевой последовательности, Гн·10 ⁻³ /км	1,29/4,05	1,25/4,14	1,32/4,29	1,2/4,29	1,37/4,13
Емкость прямой и нулевой последовательности, Ф·10 ⁻⁹ /км	8,62/58,62	8,62/58,62	8,62/58,62	8,62/58,62	8,62/58,62

Модель трехобмоточного трансформатора выполнена на базе блока Three-Phase Transformer (Three Windings), схема замещения которого представлена на рис. 2.

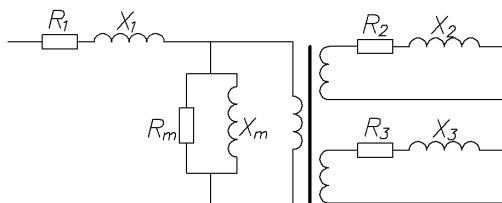


Рис. 2. Однолинейная схема замещения трехобмоточного трансформатора

Расчет параметров схемы замещения трансформатора проведен по методике, изложенной в работе [8]. Рассчитанные параметры схемы замещения трансформатора приведены в табл. 2. Сопротивления обмоток приведены к своему напряжению.

Таблица 2

Параметры схем замещения трансформаторов

Параметр схемы замещения	Марки трансформаторов		
	ТДТН 25 000/110	ТМН 2500/110	ТМТН 6300/115
Активное сопротивление обмоток ВН R_1 , Ом	1,375	26,45	3,7
Активное сопротивление обмоток СН R_1 , Ом	0,154	–	0,415
Активное сопротивление обмоток НН R_1 , Ом	0,005	0,009	0,009
Индуктивное сопротивление обмотки ВН X_1 , Ом	56,365	523,71	236,161
Индуктивное сопротивление обмотки СН X_1 , Ом	–2,671	–	–1,05
Индуктивное сопротивление обмотки НН X_1 , Ом	39,489	–	131,516
Сопротивление ветви намагничивания R_m , Ом	$629,723 \cdot 10^3$	$3389,831 \cdot 10^3$	$1538,46 \cdot 10^3$
Индуктивность ветви намагничивания L_m , Гн	543,466	2808,389	1390,138

Результатом проделанной работы является модель, изображенная на рис. 3. После моделирования выбранного участка энергосистемы полученную модель необходимо верифицировать. Для верификации модели на однолинейной схеме были выбраны точки (рис. 4), в которых были определены величины токов и напряжений при КЗ. Полученные данные сравниваются с результатами расчетов, произведенных в программе АРМ СРЗА [9], которая в настоящее время используется системным оператором единой энергетической системы. Сравнение полученных данных показано в табл. 4, 5.

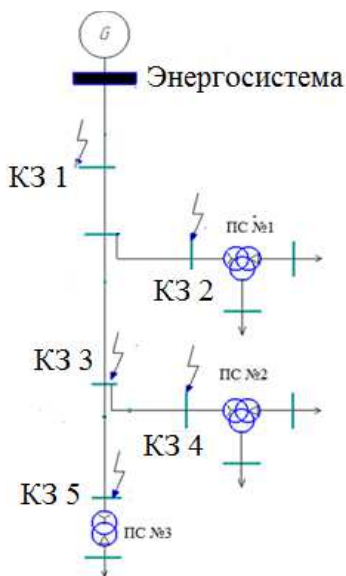


Рис. 4. Места КЗ для верификации модели

Таблица 4

Сравнение токов КЗ реальной ВЛ и ее модели

№ п/п	Вид КЗ	Величина токов КЗ								
		I_a , А			I_b , А			I_c , А		
		Реаль- ные	Модель	Δ , %	Реаль- ные	Модель	Δ , %	Реаль- ные	Модель	Δ , %
1	3фз	5586	5345	4,31	5586	5345	4,31	5586	5345	4,31
	2фз	—	—	—	4837	4632	4,24	4837	4632	4,24
	1фз	4320	3860	10,65	—	—	—	—	—	—
2	3фз	5079	4852	4,47	5079	4852	4,47	5079	4852	4,47
	2фз	—	—	—	4398	4205	4,39	4398	4205	4,39
	1фз	3845	3450	10,27	—	—	—	—	—	—
3	3фз	2034	1909	6,15	2034	1909	6,15	2034	1909	6,15
	2фз	—	—	—	1761	1658	5,85	1761	1658	5,85
	1фз	1331	1210	9,09	—	—	—	—	—	—
4	3фз	1992	1869	6,17	1992	1869	6,17	1992	1869	6,17
	2фз	—	—	—	1725	1623	5,91	1725	1623	5,91
	1фз	1300	1185	8,85	—	—	—	—	—	—
5	3фз	1857	1741	6,25	1857	1741	6,25	1857	1741	6,25
	2фз	—	—	—	1608	1512	5,97	1608	1512	5,97
	1фз	1220	1113	8,77	—	—	—	—	—	—

Сравнение напряжений при КЗ реальной ВЛ и ее модели

№ п/п	Вид КЗ	Величины напряжений при КЗ								
		$U_{a\phi}$, кВ			$U_{b\phi}$, кВ			$U_{c\phi}$, кВ		
		Реаль- ные	Модель	Δ , %	Реаль- ные	Модель	Δ , %	Реаль- ные	Модель	Δ , %
1	3фз	40,55	38,81	4,29	40,55	38,81	4,29	40,55	38,81	4,29
	2фз	71,64	66,46	7,23	52,82	50	5,34	47,35	44,36	6,31
	1фз	51,22	46,2	9,8	70,02	65,5	6,46	69,52	65,66	5,55
2	3фз	43,46	41,45	4,62	43,46	41,45	4,62	43,46	41,45	4,62
	2фз	71,64	66,46	7,23	54,6	51,6	5,49	49,18	46,08	6,30
	1фз	53,5	48,4	9,53	70,15	65,55	6,56	69,78	65,72	5,82
3	3фз	60,52	56,78	6,18	60,52	56,78	6,18	60,52	56,78	6,18
	2фз	71,64	66,46	7,23	64,83	60,68	6,40	62,11	57,98	6,65
	1фз	65,39	60,13	8,04	71,16	65,2	8,38	71,02	65,64	7,58
4	3фз	60,76	56,98	6,22	60,76	56,98	6,22	60,76	56,98	6,22
	2фз	71,64	66,46	7,23	64,99	60,8	6,45	62,29	58,15	6,65
	1фз	65,53	60,25	8,06	71,08	65,19	8,29	71,04	65,68	7,55
5	3фз	61,58	57,7	6,30	61,58	57,7	6,30	61,58	57,7	6,30
	2фз	71,64	66,46	7,23	65,6	61,34	6,49	62,85	58,66	6,67
	1фз	65,93	60,54	8,18	71,09	65,31	8,13	71,09	65,8	7,44

Созданная имитационная модель ЭЭС в среде моделирования MatLab/Simulink позволяет производить расчеты параметров различных режимов работы системы, результаты которых используются в дальнейшем при выборе электроэнергетического оборудования и настройки устройств релейной защиты и автоматики. Экспериментальная проверка показала, что погрешность созданной модели при расчетах величин токов и напряжений при многофазных КЗ не превышает 10 %, при однофазных КЗ не более 15 %. Большая погрешность расчетов при однофазных КЗ обусловлена тем, что на величины токов и напряжений нулевой последовательности влияют режимы заземления нейтралей трансформаторов, установленных на соседних подстанциях. При моделировании участка энергосистемы эти режимы не учитывались. Для более точного расчета однофазных КЗ необходимо моделировать ЭЭС полностью.

Библиографический список

1. Валиуллин К.Р. Имитационное моделирование электротехнической системы уличного освещения // Электротехнические системы и комплексы. – 2018. – № 4(41). – С. 48–55.
2. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Черепанов А.В. Моделирование режимов систем тягового электроснабжения при движении тяжеловесных поездов // Вестник ИрГТУ. – 2016. – № 11(118). – С. 133–142.

3. Моделирование сельских распределительных электрических сетей 10/0,4 кВ / С.В. Кочергин, А.В. Кобелев, Н.А. Хребтов, П.А. Киташин, К.И. Терехов // *Fractal Simulation*. – 2013. – № 1(5). – С. 5–13.

4. Программно-информационное обеспечение комплексов для функциональных испытаний цифровых токовых защит электроустановок в системе динамического моделирования MatLab/Simulink / А.В. Новаш, Ф.А. Романюк, Ю.В. Румянцев, В.Ю. Румянцев // *Энергетика. Известия вузов и энергетических объединений СНГ*. – 2017. – № 4. – С. 291–308.

5. Григорьев А.В., Глеклер Е.А. Компьютерное моделирование и исследование единой электроэнергетической системы в среде Simulink // *Вестник Гос. ун-та мор. и реч. флота им. адм. С.О. Макарова*. – 2015. – № 2(30). – С. 185–191.

6. Ананичева С.С., Мызин А.Л. Схемы замещения и установившиеся режимы электрических сетей: учеб. пособие. – 6-е изд., испр. – Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2012. – 80 с.

7. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы: учеб. для электротехн. и энергет. вузов и ф-тов. – М.: Энергия, 1970.

8. Груздев И.А., Идельчик В.И. Электрические системы и сети: учеб. для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.

9. Программный комплекс для расчетов электрических величин при повреждениях сети и уставок релейной защиты: св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ / В.Н. Черняков, Г.Ф. Седельников, Н.Л. Дубрановская, В.В. Стенина, Е.Н. Рубина; правообл. Производственный кооператив «БРИЗ». – № 2011616895; заявл. 15.09.2011, зарег. в Реестре программ для ЭВМ 31.10.2011. – 1 с.

Сведения об авторах

Лобанов Вадим Андреевич – магистрант Оренбургского государственного университета, гр. 18ЭЭ(м)АЭСК, г. Оренбург, e-mail: LobanovVadim56@mail.ru

Валиуллин Камиль Рафкатович – старший преподаватель кафедры «Электро- и теплоэнергетика» Оренбургского государственного университета, г. Оренбург, e-mail: ValiullinKamil91@gmail.com

А.В. Чабан, В.В. Быковский

**РАЗВИТИЕ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ
СПОСОБОВ ЗАЩИТЫ ОТ ФЕРРОРЕЗОНАНСА
В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 6–330 кВ**

Рассмотрено развитие различных способов защиты от феррорезонанса и дана оценка эффективности каждого из них.

Ключевые слова: феррорезонанс, трансформатор напряжения, электрические сети.

A.V. Chaban, V.V. Bykovsky

**DEVELOPMENT AND ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY
OF METHODS OF PROTECTION AGAINST FERRORESONANCE
IN ELECTRIC GRIDS 6-330 kV**

This article will consider the development of various methods of protection against ferroresonance and assess the effectiveness of each of them.

Keywords: ferroresonance, voltage transformer, electrical grids.

Феррорезонанс – опасное явление, оказывающее негативное влияние на техническое состояние электрооборудования (в частности, на трансформаторы напряжения).

Опасные феррорезонансные колебания чаще наблюдаются в электрических сетях, имеющих небольшую протяженность, из-за относительно небольшой емкости этих сетей и, соответственно, большей вероятности возникновения феррорезонансных условий в контурах, содержащих емкости сети и индуктивности намагничивания фаз ТН.

К таким сетям прежде всего следует отнести распределительные сети, состоящие в основном из воздушных линий (погонная емкость КЛ 6(10) кВ в десятки раз превышает погонную емкость ВЛ этих же классов напряжения). Опасные феррорезонансные колебания могут также наблюдаться в электрических сетях генераторного напряжения блоков электростанций и, кроме того, в сетях их собственных нужд, в электрических сетях 6(10) кВ насосных и компрессорных станций магистральных нефте- и газопроводов. В этих сетях вращающиеся электрические машины (генераторы или двигатели) присоединены

к повышающим силовым трансформаторам с помощью кабелей относительно небольшой длины, т.е. обладающих сравнительно небольшой емкостью. В данной статье будет рассмотрено развитие различных способов защиты от феррорезонанса и дана оценка эффективности каждого из них.

Существует три наиболее распространенных способа нейтрализации феррорезонанса: 1) замена ТН типа НТМИ в сетях 6–35 кВ на ТН типа НАМИ и НАЛИ; 2) установка в нейтрали сети высокоомного сопротивления (альтернатива НАМИ) но на шинах секции необходима установка ФМЗО; 3) введение в схему распределительного устройства подстанции дополнительных резисторов и емкостей, программирование последовательности отключения коммутационных аппаратов.

Рассмотрим каждый из этих способов подробнее.

Замена ТН типа НТМИ в сетях 6–35 кВ на ТН типа НАМИ и НАЛИ. Принципиальные схемы ТН, предназначенных для эксплуатации в сетях с изолированной нейтралью, приведены на рис. 1.

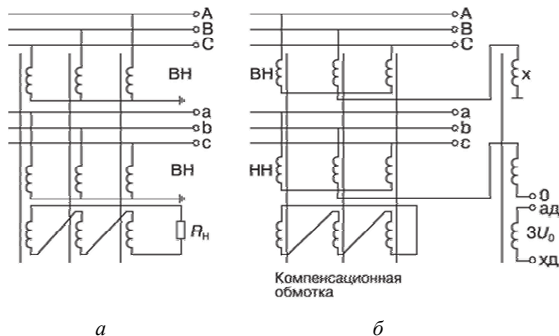


Рис. 1. Принципиальные схемы ТН 6(10) кВ типа НТМИ (а) и НАМИ (б)

Антирезонансный ТН типа НАМИ представляет собой, в сущности, два трансформатора (трехфазный и однофазный), расположенные в одном корпусе. Однофазный трансформатор за счет большого количества витков обладает почти линейной кривой намагничивания и большим индуктивным сопротивлением. Антирезонансные свойства НАМИ в основном обеспечиваются компенсационной обмоткой, соединенной в треугольник и замкнутой накоротко.

Как было сказано выше, наиболее часто феррорезонанс возникает в распределительных сетях 6–35 кВ, а также в сетях генераторного напряжения и собственных нужд электростанций. Следует отметить,

что емкость экранированных токопроводов, применяющихся на генераторном напряжении в мощных блоках, существенно меньше емкости соответствующих кабельных присоединений. Допустимые токи (эффективные значения) в обмотке ВН ТН 6(10) кВ составляют 0,2–0,3 А. Расчеты [1] при ОДЗ в распределительной сети 6 кВ показали, что условия существования феррорезонанса при оснащении сети ТН типа НТМИ соблюдаются при величине емкости, не превышающей примерно 3 мкФ. Такая емкость отвечает протяженности воздушной сети менее 240 км, а кабельной сети – менее 3 км. В случае же оснащения сети ТН типа НАМИ устойчивого феррорезонанса не наблюдалось при любой протяженности сети (при проведении расчетов индуктивность намагничивания однофазного трансформатора принималась равной 20–30 Гн).

Аналогичные результаты были получены при исследовании процессов, сопровождающих ОДЗ на одной из секций сети собственных нужд 6 кВ ТЭЦ [1]. На рис. 2 приведены компьютерные осциллограммы токов в обмотке ВН ТН при установке на секции ТН типа НТМИ (см. рис. 2, а) и НАМИ (см. рис. 2, б).

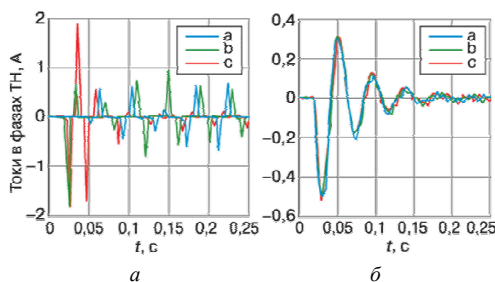


Рис. 2. Токи в фазах обмотки ВН ТН при ОДЗ на секции ССН ТЭЦ ($3C_{\Phi} = 3$ мкФ) типа НТМИ (а) и НАМИ (б)

Из этих осциллограмм следует, что при установке на секции ТН типа НТМИ наблюдается установившийся феррорезонанс, причем токи в обмотке ВН ТН превышают допустимый уровень. При установке же ТН типа НАМИ условия существования феррорезонанса нарушаются за счет того, что компенсационная обмотка шунтирует нелинейную индуктивность ТН в контуре нулевой последовательности. Эквивалентная схема нулевой последовательности сети с изолированной нейтралью и ТН типа НАМИ приведена на рис. 3. Обозначения на рис. 3: C_{Σ} – суммарная емкость сети; R_1 , L_1 – активное со-

противление и индуктивность рассеивания обмотки ВН ТН; R_N , L_N – активное сопротивление и индуктивность дополнительного трансформатора в нейтрали; R'_2 , L'_2 – приведенные активное сопротивление и индуктивность компенсационной обмотки; L_μ – нелинейная индуктивность шунта намагничивания нулевой последовательности.

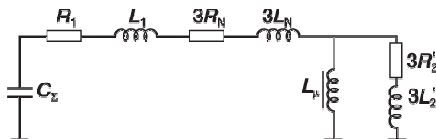


Рис. 3. Эквивалентная схема нулевой последовательности сети с изолированной нейтралью и ТН типа НАМИ

Нелинейная индуктивность шунтируется компенсационной обмоткой, которая обладает малым активным сопротивлением и индуктивностью. При появлении на емкости напряжения нулевой последовательности (при ОДЗ) емкость разряжается через компенсационную обмотку. При этом в фазах ТН возникает характерный затухающий колебательный процесс (см. рис. 2, б). Токи в фазах ТН практически одинаковые, так как на токи намагничивания ТН накладывается большой ток нулевой последовательности. Увеличение числа ТН типа НАМИ приведет к увеличению мощности шунта намагничивания нулевой последовательности, но также уменьшится и эквивалентное сопротивление компенсационной обмотки. Таким образом, возникновение феррорезонанса в ТН типа НАМИ полностью исключается даже при параллельной работе нескольких ТН.

Установка ТН типа НАМИ является достаточно эффективной мерой. Однако по условиям пожаробезопасности этих сетей (например, сетей АЭС) необходимо применять ТН с литой изоляцией типа ЗНОЛ, тогда как в ТН типа НАМИ в качестве изоляционной среды используется трансформаторное масло.

Установка в нейтрали сети высокоомного сопротивления. Альтернативным решением для исключения опасных феррорезонансных колебаний в сетях 6–35 кВ является оснащение нейтрали сети высокоомным резистором. Следует, однако, учесть, что применение этой меры в ССН электрических станций, питаемых от трансформаторов СН, с обмотками низшего напряжения, соединенными в треугольник, требует установки на шинах секции специального устройства трансформаторного типа для выделения нейтрали, напри-

мер ФМЗО. Токи в обмотке ВН ТН типа НТМИ при ОДЗ на шинах секции той же ТЭЦ, для которой были приведены осциллограммы рис. 2, при установке ФМЗО, оснащенного высокоомным резистором в нейтрали (750–1000 Ом), приведены на рис. 4.

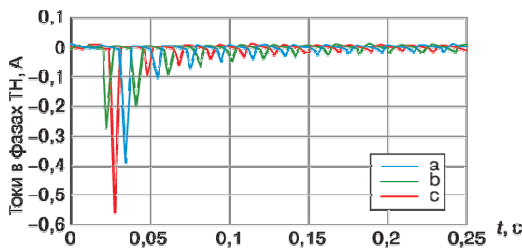


Рис. 4. Токи в фазах обмотки ВН ТН типа НТМИ при ОДЗ на секции ССН ТЭЦ, нейтраль которой оснащена высокоомным резистором

Введение дополнительных резисторов и емкостей, программирование последовательности отключения коммутационных аппаратов. Данный способ является одним из старейших и был впервые опробован и введен в эксплуатацию в 1980 г. на подстанциях «Краснодарэнерго» класса напряжения 330/220/110/35 и 220/110/10.

В распределительных устройствах 110–330 кВ, оборудованных воздушными выключателями с емкостными делителями напряжения и электромагнитными трансформаторами напряжения типа НКФ, при определенных условиях возникает феррорезонанс, сопровождающийся повреждениями трансформаторов напряжения и вентильных разрядников. Повреждения происходили на ПС 330/220/110 кВ в РУ 330 кВ, выполненной по схеме 3/2. На этой же ПС в РУ 110 кВ с двумя системами шин при работе ДЗ произошло отключение воздушных выключателей всех присоединений, АПВ при этом не сработало из-за высокого уровня напряжения на шинах, обусловленного возникновением феррорезонанса. Напряжение на ТН при отключении воздушных выключателей в соответствии с эквивалентной схемой замещения для ненагруженных шин (рис. 5) зависит от соотношения плеч C_1 и C_2 емкостного делителя напряжения

$$U_L = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \cdot \frac{\omega^2}{\omega^2 - \beta^2} E, \quad (1)$$

где C_1 и C_2 – емкости делителя выключателя и системы шин; β – собственная частота схемы, $\beta = [L(C_1 + C_2)]^{-\frac{1}{2}}$; L – индуктивность намагничивания трансформатора напряжения.

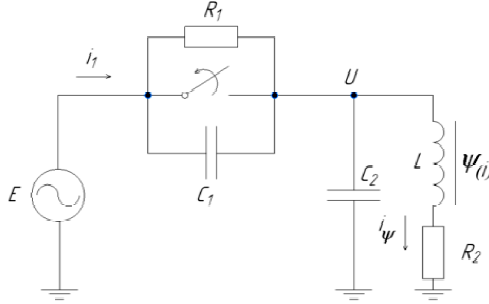


Рис. 5. Схема замещения для расчета феррорезонанса на ненагруженных шинах

Для оценки необходимой величины емкости системы шин были проведены расчеты процессов, устанавливающихся после отключения выключателя. При этом схема описывалась следующими расчетными уравнениями:

$$\frac{dU_L}{dt} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \omega E \cos(\omega t + \varphi) - \frac{\beta^2}{\omega} (i - i_1); \quad (2)$$

$$\frac{d\psi}{dt} = \omega U_L - \frac{R_2}{L} i; \quad (3)$$

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{C_2}{C_1 + C_2} \omega^2 E \cdot \frac{L}{R_1} \cos(\omega t + \varphi) + \frac{1}{R_1(C_1 + C_2)} (i - i_1), \quad (4)$$

где R_2 , L – сопротивление и индуктивность намагничивания трансформатора напряжения; R_1 – сопротивление, имитирующее включенное и отключенное состояния выключателя; $\psi(i)$ – характеристика намагничивания трансформатора напряжения.

Сама характеристика намагничивания моделируется кусочно-ломанной линией непосредственно по точкам экспериментальной кривой намагничивания

$$i = [\psi - \psi_{k-1} \text{sign} \psi] \frac{i_k - i_{k-1}}{\psi_k - \psi_{k-1}} + i_{k-1} \text{sign} \psi, \quad (5)$$

где ψ_k, i_k – координаты k -й точки характеристики намагничивания трансформатора, причем $\psi_{k-1} \leq |\psi| \leq \psi_k, k = 1, 2, \dots, n$.

Расчеты процессов на ненагруженных шинах для каждого класса напряжения и соответствующих параметров трансформаторов напряжения в диапазоне емкостей выключателей и шин $500 \text{ пФ} \leq C_1 \leq 6000 \text{ пФ}$; $1000 \text{ пФ} \leq C_2 \leq 15\,000 \text{ пФ}$ производились в следующей последовательности: включение схемы и счет до установления процесса, отключение выключателя и счет до установления процесса, после установления процесса вывод на печать мгновенных значений напряжений и токов в интервале времени 0,02 с, построение формы кривых напряжений и токов в этом же интервале, расчет действующих значений токов через трансформатор напряжения за промежуток времени 0,25 с после установления процесса.

По результатам расчетов были получены формы кривых напряжений и токов через НКФ 110 кВ, а также значение C_2 (величина емкости системы шин) [2].

По результатам анализа областей возникновения резонанса [2] следует, что с увеличением емкости шин уменьшается вынужденная составляющая напряжения, снижается собственная частота схемы. Резонансы на частоте ω , имеющие место при больших значениях C_1 (большом количестве отключенных выключателей), с увеличением C_2 переходят в субгармонические резонансные колебания на частотах $1/3 \omega, 1/5 \omega$ с амплитудой $(0,3-0,4)U_{\text{ф}}$.

Действующие значения токов через ТН лежат в пределах $(0,5-2)I_{\text{ХХ}}$. Таким образом, выявляется возможность подавления феррорезонанса за счет искусственного увеличения емкости шин.

Для подтверждения теоретических выводов были проведены эксперименты. В РУ 330 кВ к секции шин в ячейке ТН параллельно трансформатору напряжения без какого-либо коммутационного аппарата были смонтированы конденсаторы в.ч. связи и типа СМР-166 $\sqrt{3}$ по два элемента последовательно на каждой фазе. Их суммарная емкость составила 7000 пФ. В РУ 110 кВ после проведенных мероприятий дополнительная емкость составила 14 000 пФ.

В результате проведенных испытаний было установлено, что введение дополнительной емкости в схему позволяет срывать феррорезонансные колебания на основной частоте. Для срыва колебаний на частоте $1/3\omega$ с амплитудой $0,2U_{\text{ф}}$ необходимо ввести дополнитель-

ную активную нагрузку – подключить резисторы номиналом 25–40 Ом с низкой стороны ТН. Таким образом, данный способ является эффективной мерой по срыву феррорезонанса при плановых и аварийных отключениях на подстанциях, РУ которых в ближайшем будущем не подлежат расширению. Кроме того, полученная схема проста в исполнении, требует минимального эксплуатационного ухода и, в отличие от варианта с установкой антирезонансных ТН, может быть собрана из уже имеющегося в распоряжении эксплуатирующей организации оборудования.

При возникновении феррорезонанса амплитуда напряжения может достигать $2U_{\phi}$, а токи в обмотке ВН трансформатора напряжения повышаться до недопустимого уровня. Применение антирезонансных трансформаторов напряжения является радикальным способом предотвращения феррорезонанса. Данный способ весьма затратен. Кроме того, он сложен для реализации на конкретных действующих подстанциях, поэтому рекомендуется только при реконструкции или строительстве новых энергообъектов. В сетях 110–150 кВ наиболее надежный, эффективный и дешевый способ – искусственное увеличение емкости шин.

Библиографический список

1. Кадомская К., Лаптев О. Антирезонансные трансформаторы напряжения. Эффективность применения // Новости ЭлектроТехники. – 2006. – № 6(42).

2. Борисенко Л.С., Панасюк Д.И., Миронов Г.А. Предотвращение феррорезонанса на ненагруженных шинах РУ 110–330 кВ / «Краснодарэнерго» – АзНИИЭ. – Краснодар, 1984.

Сведения об авторах

Чабан Антон Витальевич – магистрант Оренбургского государственного университета, гр. 17ЭЭ(м)АЭСК, г. Оренбург, e-mail: chabananton95@gmail.com

Быковский Виктор Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированный электропривод, электромеханика и электротехника» Оренбургского государственного университета, г. Оренбург, e-mail: bykovskyvictor@yandex.ru

В.Б. Шлейников, В.В. Викторов, Д.А. Япаров

К ВОПРОСУ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМЫ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Приведены сведения о выбранном направлении исследования применения накопителей электроэнергии с целью повышения их практической значимости для электроснабжения потребителей с небольшим электропотреблением.

Ключевые слова: накопители электроэнергии, программируемое электропотребление.

V.B. Shleynikov, V.V. Viktorov, D.A. Yaparov

TO THE QUESTION OF USE OF THE SYSTEM OF STORES OF THE ELECTRIC POWER FOR POWER SUPPLY OF INDIVIDUAL CONSUMERS

Data about chosen the directions of a research of use of stores of the electric power for the purpose of increase in their practical significance for power supply of consumers with a small power consumption are provided.

Keywords: electric power stores, programmable power consumption.

Тема применения накопителей электроэнергии не нова. Интерес к проблеме накопления электроэнергии периодически усиливается, и связаны эти периоды возрастания интереса с появлением новых технических устройств и совершенствованием существующих. Неизбежное снижение интереса к накопителям вызвано в первую очередь высокой стоимостью комплектующих устройств.

Целью нашей работы является повышение эффективности использования накопителей электроэнергии за счет комплекса организационных и технических мероприятий на примере электроснабжения индивидуального жилого дома.

Для достижения поставленной цели предполагается решить следующие задачи:

1. Составить характеристики электропотребления отдельными электроприемниками.
2. Выполнить ранжирование электроприемников.

3. Разработать алгоритм электропотребления при электроснабжении от накопителя электроэнергии.

В настоящее время отмечают следующие направления использования накопителей:

- 1) обеспечение требуемой надежности электроснабжения;
- 2) кондиционирование электроэнергии;
- 3) выравнивание графика электрической нагрузки;
- 4) оптимизация затрат на покупку электроэнергии путем использования ночного тарифа;
- 5) возможность получать электроэнергию из «несетевых» источников и др.

Предлагается использовать «программируемое электропотребление», т.е. использование возможностей накопителя и других источников по заранее заданному графику. Это предполагает несколько иной режим электропотребления, чем принят сейчас. Например, потребитель ставит задачу техническому устройству и определяет крайний срок ее исполнения, а устройство, управляемое контроллером, выбирает источники энергии, наименее затратные для выполнения поставленной задачи. Такой режим работы требует некоторого времени ожидания со стороны потребителя результатов выполнения задач.

Режим программируемого электропотребления предусматривает также выполнение приоритетных задач. Для этих целей возможно использовать идентификацию электроприемников, в том числе по месту их расположения, величине электрической нагрузки, режима электропотребления и другим критериям, что позволит в дальнейшем выполнять точное управление электропотреблением.

Наряду с решением задачи идентификации электроприемников и как можно более точного определения ожидаемых электрических нагрузок, оценивается возможность адаптивного определения емкости накопителя. В ходе тестирования работы системы автономного электропитания по разработанному алгоритму с использованием статистического метода выполняется определение параметров накопителя при различных перерывах в электроснабжении и некоторого набора электроприемников. Решение поставленных задач, а также исследование перспектив применения систем управления автономным электропитанием позволит приблизиться к достижению поставленной цели. Также следует принимать во внимание неизбежное снижение стоимости существующих накопителей электроэнергии, появление новых образцов накопителей и устройств для управления ими.

Библиографический список

1. Эксперт о перспективе использования свинцово-кислотных технологий [Электронный ресурс] // Брест Сити Новости. – URL: <http://brestcity.com/blog/ekspert-o-perspektive-ispolzovaniya-svincovo-kislotnykh-tekhnologij> (дата обращения: 12.03.2019).
2. Никитин Д.В., Кузнецов О.Н. О применении накопителей электроэнергии в электроэнергетике // Электричество. – 2007. – № 9. – С. 52–60.
3. Колесников М. Новое в разработке гибридных сетевых накопителей электроэнергии // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2011. – № 8. – С. 27.
4. Перспективы применения накопителей электроэнергии для сетей электроснабжения 0,4 кВ / Е.В. Раубаль [и др.] // Вестник Моск. энергет. ин-та. – 2013. – № 3. – С. 055–057.
5. Журавлев Д. Применение сетевых накопителей электроэнергии в электроэнергетических системах // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2013. – № 4(19). – С. 80–83.
6. Горянский А. Опыт внедрения накопителей электроэнергии на объектах с децентрализованным энергоснабжением // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2015. – № 4(31). – С. 96–98.
7. Куликов А.Л., Осокин В.Л., Папков Б.В. Проблемы и особенности распределенной электроэнергетики // Вестник НГИЭИ. – 2018. – № 11(90). – С. 123–136.

Сведения об авторах

Шлейников Вячеслав Борисович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электро- и теплоэнергетика» Оренбургского государственного университета, г. Оренбург, e-mail: shleinikov@yandex.ru

Викторов Владислав Викторович – магистрант Оренбургского государственного университета, гр. 18ЭЭ(м)АЭСК, г. Оренбург, e-mail: vladon_vladon@mail.ru

Япаров Денис Алексеевич – магистрант Оренбургского государственного университета, гр. 18ЭЭ(м)АЭСК, г. Оренбург, e-mail: denis_melekesov@mail.ru

Н.В. Жужгов, Н.Н. Вилисов, А.Т. Ключников

ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ НА УГОЛ НАГРУЗКИ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

В настоящее время представляет интерес синхронный пуск синхронного двигателя, т.е. когда пуск СД осуществляется при заданной низкой частоте питающей сети (5–10 Гц) от преобразователя частоты и при поданном напряжении на обмотку возбуждения.

Исследовано влияние частоты питающей сети на параметры СД и угол нагрузки.

Ключевые слова: синхронный пуск, синхронный двигатель, угол нагрузки.

N.V. Zhuzhgov, N.N. Vilisov, A.T. Klyuchnikov

EFFECT OF MAINS FREQUENCY ON THE LOAD ANGLE OF A SYNCHRONOUS MOTOR

At present, it is of interest to synchronously start a synchronous motor, that is, when a synchronous motor is started at a given low frequency of the mains supply from the frequency converter and at the applied voltage to the field winding. The article studies the influence of the mains frequency on the parameters of a synchronous motor and the angle of the load.

Keywords: synchronous start, synchronous motor, load angle.

В настоящее время наибольшее внимание с точки зрения теоретической и практической электромеханики привлекает синхронный пуск синхронного двигателя (СД) от преобразователей частоты (ПЧ).

Известно исследование синхронного пуска СД при частоте напряжения $f = 0,15$ Гц. Как правило, в исследованиях при пуске СД от ПЧ не рассматривается вопрос о влиянии активного сопротивления статорной обмотки R_s на векторный угол нагрузки Θ_U . Векторный угол нагрузки Θ_U – это угол между осью q и напряжением U .

В предлагаемой статье исследованы режимы пуска СД, разработанного в ПНИПУ доцентами кафедры ЭТиЭМ А.Т. Ключниковым и А.Д. Коротаевым [1, 2], который предназначен для плунжерного насоса, помещаемого в скважину небольшого диаметра.

Основной задачей исследования предлагаемой статьи является определение взаимосвязей между параметрами двигателя с векторным углом нагрузки Θ_U в процессе синхронного пуска СД. Для исследования необходимо разработать рабочую модель и методику. В предлагаемой статье мощность СД $P_n = 10$ кВт. В теории синхронных микромашин выделяют два угла нагрузки [3]. На векторной диаграмме (рис. 1) показаны углы нагрузки Θ_U и Θ_e , где Θ_U – векторный угол нагрузки, угол между осью q и вектором напряжения U ; Θ_e – физический угол нагрузки, угол между осью q и вектором ЭДС E , а также угол между магнитным потоком ротора и статора.

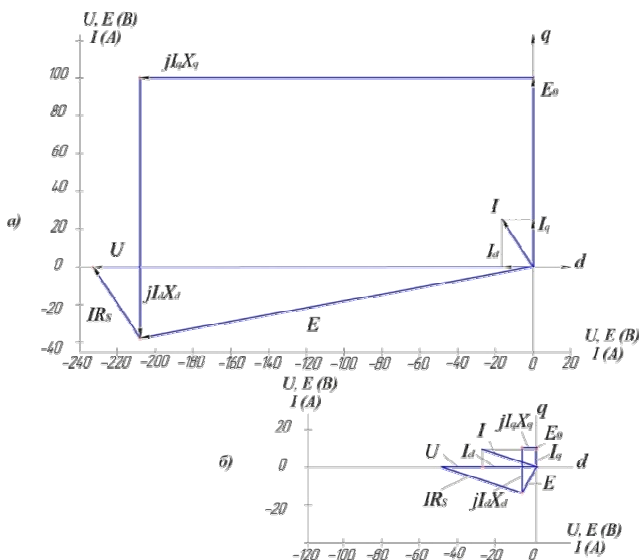


Рис. 1. Векторная диаграмма СД при частоте сети 50 и 5 Гц:
а – $\Theta_U = 90^\circ$, $f = 50$ Гц; б – $\Theta_U = 90^\circ$, $f = 5$ Гц

На векторных диаграммах рис. 1 продемонстрированы изменения напряжений, ЭДС, разность значений между углами Θ_U и Θ_e в зависимости от частоты (50 и 5 Гц) при максимальном векторном угле нагрузки $\Theta_U = 90^\circ$. В обоих случаях величина вектора тока соответствует номинальному значению и $I = 30$ А для двигателя мощностью $P_n = 10$ кВт. Для построения векторной диаграммы использовано уравнение

$$\dot{U} = \dot{E}_0 + j\dot{I}_d\dot{X}_d + j\dot{I}_q\dot{X}_q + \dot{I}R_s, \quad (1)$$

где $\dot{U}$ – питающее напряжение; $\dot{E}_0$ – ЭДС, которая наводится за счет магнитного потока, зависящего от частоты; $\dot{I}_d, \dot{I}_q$ – токи статора по продольной и поперечной осям; $\dot{X}_d, \dot{X}_q$ – индуктивные сопротивления статора по продольной и поперечной осям, зависящие от частоты.

На векторной диаграмме рис. 1, а вектор напряжения сдвинут на 90° по отношению к оси q . При неизменной величине тока статора $I = 30$ А величина напряжения необходима $U = 233$ В. Разность углов Θ_U и Θ_e составляет 10° . На рис. 1, б представлена векторная диаграмма СД при частоте питающей сети 5 Гц при том же векторном угле нагрузки ($\Theta_U = 90^\circ$). Разность углов Θ_U и Θ_e увеличилась по сравнению с разностью углов на рис. 1, а и равна 51° .

Анализ векторных диаграмм, представленных на рис. 1 позволяет сделать вывод, что уменьшение частоты влечет за собой уменьшение величины вектора ЭДС E и электромагнитного момента $M_{эм}$, а также увеличение разности между векторным Θ_U и физическим Θ_e углами нагрузки при неизменном токе статора.

В СД средней и большой мощности векторный угол нагрузки Θ_e есть не что иное, как физический угол нагрузки Θ_U , так как R_S приравнивают к нулю. Но при уменьшении частоты питающего напряжения активное сопротивление R_S становится соизмеримо с реактивным сопротивлением X_S , поэтому углы Θ_e и Θ_U не равны. Следовательно, для исследования пусков СД от сети переменного тока с частотой 50, 5 Гц необходимо разработать модель в среде MatLab/Simulink. Для того чтобы получить физический угол нагрузки Θ_e , необходимо произвести эквивалентное преобразование. Для исследования процессов в СД разработана модернизированная модель, позволяющая получить физический угол нагрузки Θ_e (рис. 2).

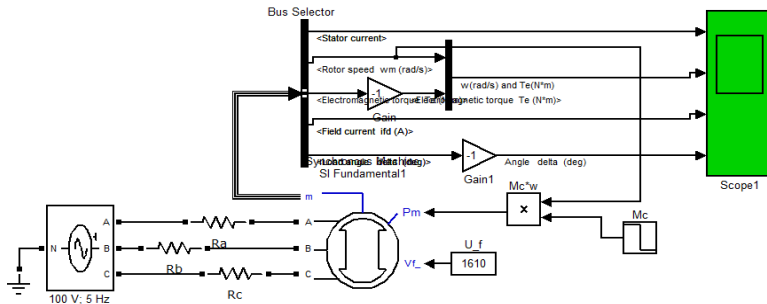


Рис. 2. Схема модели для исследования поведения угла нагрузки Θ

В параметрах СД типовой модели активное сопротивление обмотки статора $R_S = 1,48$ Ом. В модернизированной модели для получения физического угла нагрузки Θ_e величины сопротивления линии R_a, R_b, R_c выбрали равными 1,48 Ом, а активное сопротивление статора $R_S = 0,001$ Ом. На рис. 3 представлены результаты исследования синхронного пуска СД модернизированной модели при частоте питающей сети 5 Гц.

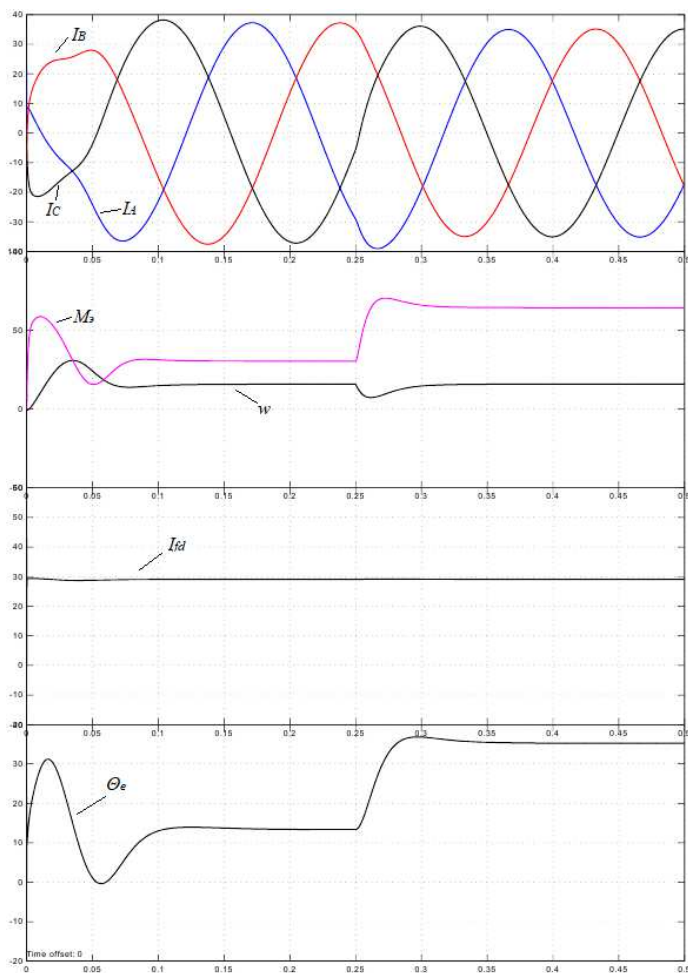


Рис. 3. Синхронный пуск СД модернизированной модели при частоте питающей сети 5 Гц

Момент сопротивления в начале синхронного пуска равен $0,5 M_n$ и через время $0,25$ с изменяется до номинального $M_n = 64$ Нм. С увеличением момента сопротивления угол нагрузки Θ_e с 13° до 36° , что соответствует физике процесса, т.е. получим график физического угла нагрузки Θ_e .

Из анализа результатов, представленных на рис. 3, видно, что величины статорных токов I_s , частоты вращения ω , электромагнитного момента $M_{эм}$ и тока возбуждения I_f не изменились при тех же условиях подачи момента сопротивления, по сравнению с синхронным пуском типовой модели.

1. Разработана математическая модель в среде MatLab/Simulink для исследования углов нагрузки Θ_U или Θ_e в цилиндрическом линейном вентильном двигателе.

2. Необходимость разработки модернизированной математической модели обусловлена появлением в процессе исследования на типовой модели отрицательных значений векторного угла Θ_U , что не соответствует физике работы СД в двигательном режиме.

3. Адекватность разработанной модели подтверждается равенством токов, момента и скорости в сравнении с типовой моделью СД.

4. Проведенные исследования показали, что в крупных СД углы Θ_U и Θ_e практически равны. Это обусловлено малым значением сопротивления статорной обмотки R_s в относительных единицах.

5. В цилиндрическом линейном вентильном двигателе активное сопротивление R_s соизмеримо с индуктивными сопротивлениями, что в большей степени проявляется на низких частотах – порядка 5 Гц и приводит к неравенству углов Θ_U и Θ_e до 50° .

Библиографический список

1. Ключников А.Т., Коротаев А.Д., Шутемов С.В. Моделирование цилиндрического линейного вентильного двигателя // Электротехника. – 2013. – № 11.

2. Влияние активного сопротивления в частотно-управляемом ЦЛВД / Д.А. Чирков, А.Т. Ключников, А.Д. Коротаев, Э.О. Тимашев // Автоматизированные системы управления и информационные технологии: материалы всерос. науч.-техн. конф. (г. Пермь, 17 мая 2018 г.): в 2 т. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2018. – Т. 2. – С. 133–138.

3. Осин И.Л., Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических устройств. – М.: Изд-во МЭИ, 2003.

4. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

Сведения об авторах

Жужгов Никита Васильевич – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ЭМ-17-1м, г. Пермь, e-mail: heinekt95@gmail.com

Вилисов Николай Николаевич – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ЭМ-17-1м, г. Пермь, e-mail: nicolavilis2013@yandex.ru

Ключников Анатолий Терентьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: aklu2011@pstu.ru

А.В. Лебедев

РАЗРАБОТКА МОДУЛЬНОГО РАСШИРЕНИЯ ДЛЯ МИКРОКОМПЬЮТЕРА RASPBERRY PI3

Рассмотрен процесс разработки универсального модуля, который можно применять для разработки мобильных роботов.

Ключевые слова: мобильный робот, распределение питания, передача данных.

A.V. Lebedev

DEVELOPMENT OF MODULAR EXTENSION FOR RASPBERRY PI3 MICROCOMPUTER IN MOBILE ROBOTS

This article describes the process of developing a universal module that can be used to develop mobile robots.

Keywords: mobile robot, power distribution, data transmission.

Робототехника является на данный момент стремительно развивающимся направлением, с каждым годом все больше процессов автоматизируются и человеческая работа сводится к минимуму. Но для того чтобы развивать это направление, необходимо готовить молодых специалистов, которые могли бы оперативно влиться в изучение основ данной области, не занимаясь рутинной и ненужной работой.

Для обучения основам робототехники студенты должны заниматься непосредственно с роботами и применять свои знания на практике. На данный момент самыми популярными платформами для обучения являются: микроконтроллер ATmega 328P на базе Arduino и микрокомпьютер Raspberry Pi3.

Raspberry Pi3 имеет гораздо больше возможностей по сравнению с Arduino, поэтому его изучение находится в приоритете. Сам по себе микрокомпьютер Raspberry Pi3 представляет собой небольшую плату (рис. 1), которая является полноценным компьютером. Но для того, чтобы полностью использовать его, необходимо расширить его функционал и сделать его использование удобным и универсальным, необходимо решить следующие задачи:

1. Обеспечить независимое питание силовой части робота (12 В), которое отвечает за стабильную работу электродвигателей.
2. Обеспечить питание микрокомпьютера Raspberry Pi3 (5 В, 2 А), здесь следует уделить особое внимание стабилизации тока.
3. Расширить возможности Raspberry Pi3 за счет использования АЦП.
4. Обеспечить быстрое и надежное соединение отдельных частей робота за счет использования разъемов.

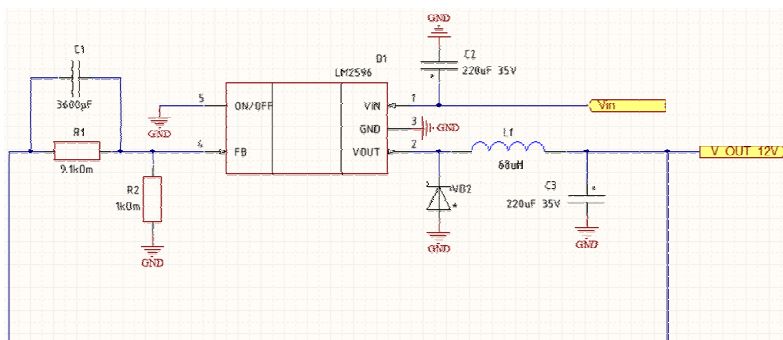


Рис. 1. Принципиальная схема импульсного регулируемого DC-DC преобразователя LM2596

Все эти задачи решаются за счет использования отдельных модулей, что влечет за собой увеличение массо-габаритных характеристик робота и его стоимости. Исходя из этого принято решение разработать модуль, который бы выполнял все поставленные выше задачи, был компактным и универсальным.

В любом роботе, для того чтобы он выполнял свои задачи, его требуется обеспечить необходимыми уровнями значений напряжения и тока. Из начальных условий для расчета следует принять, что входное напряжение $U_{\text{вх}} = 16$ В. Во время работы напряжение от аккумуляторов будет падать, но это никак не должно влиять на стабильность работы. Поскольку электродвигатели большинства роботов рассчитаны на $U_{\text{вых}} = 12$ В, необходимо обеспечить стабильное питание электродвигателей за счет использования импульсного регулируемого DC-DC преобразователя LM2596. В инструкции по применению [1], которую предоставляет производитель, можно найти принципиаль-

ную схему включения (рис. 2) и формулу для расчета выходного напряжения (см. ниже). Подставив значения напряжения в формулу, можно выразить сопротивления резисторов R_1, R_2 и подобрать ближайшие по номиналу. Все остальные элементы подбираются по рекомендациям производителя.

$$U_{\text{вых}} = 1,23 \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right).$$

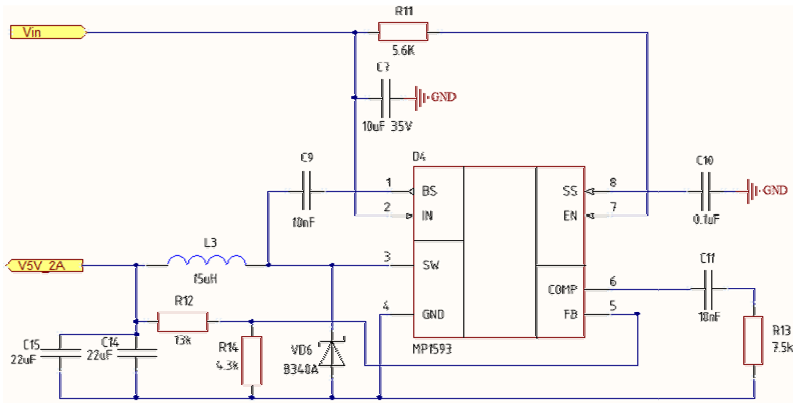


Рис. 2. Принципиальная схема понижающего преобразователя на MP1593

Следующим пунктом в разработке является задача обеспечения микрокомпьютера Raspberry Pi3 стабильным напряжением в 5 В и током в 2 А. Это необходимо для обеспечения стабильной и быстрой работы операционной системы, так как опыты показывают, что снижение тока до 1 А влечет за собой снижение производительности, а снижение тока до 0,5 А – отключение микрокомпьютера.

Для выполнения этой задачи наилучшим решением является использование понижающего преобразователя MP1593, принципиальная схема которого показана на рис. 3. В инструкции по применению [2] приводится таблица, где указаны желаемые выходные параметры напряжений и номиналы электрических компонентов, которые необходимо применить. Поскольку на борту микрокомпьютера Raspberry Pi3 нет встроенного АЦП, необходимо использовать внешний 8-битный АЦП PCF8591, в инструкции по применению [3] приведена простейшая схема подключения данного АЦП через интерфейс I2C.

Для быстрого подключения дополнительных устройств к данному расширению лучше применять различные типы разъемов. Для того чтобы вывести порты GPIO самого Raspberry Pi3, лучше использовать разъемы типа PLS, для соединения модуля с самим микрокомпьютером удобно применять разъем PBS, а для соединения с дополнительными частями – разъемы типа CWF.

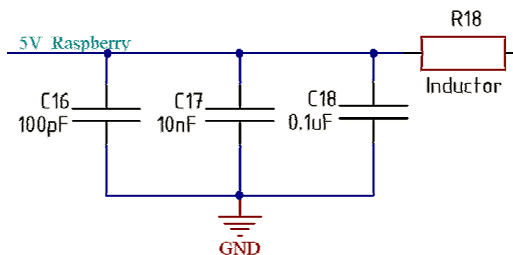


Рис. 3. Фильтрующие элементы для помех высокой частоты

Поскольку в модуле используются импульсные источники питания, необходимо использовать фильтрующие элементы: серия параллельно соединенных конденсаторов совместно с высокочастотной изолирующей катушкой (см. рис. 3). Это необходимо для того, чтобы высокочастотные помехи не влияли на работу микрокомпьютера, так как практика показала, что если не использовать данные фильтры, то возникают сбои во время передачи данных по шине I2C. Поскольку для связи со многими устройствами применяется интерфейс I2C, следует применить подтягивающие резисторы.

На рис. 4 показана принципиальная схема всего модуля, источники напряжения показаны здесь в виде блок-схем.

После разработки принципиальной схемы начинается процесс разработки печатной платы. Для начала выбирается размер будущей платы. В данном случае он составляет 65×56 мм, этот размер выбран из размеров микрокомпьютера Raspberry Pi3, чтобы модуль не выходил за габаритные размеры основной платы.

Поскольку все компоненты являются SMD и большая их часть формата 1206, т.е. имеется возможность компактного размещения всех компонентов на печатной плате. Очень важным моментом является разделение аналоговой и цифровой части электрических компонентов. Так, например, для АЦП следует сделать отдельную аналоговую землю

[4], чтобы помехи с цифровых компонентов не повлияли на работу АЦП. Также фильтрующие элементы (конденсаторы) следует размещать в непосредственной близости к входам микросхем, это необходимо делать для повышения эффективности фильтров.

После размещения компонентов производится трассировка печатной платы, на рис. 5, а, б показаны верхний и нижний слои проводников соответственно.

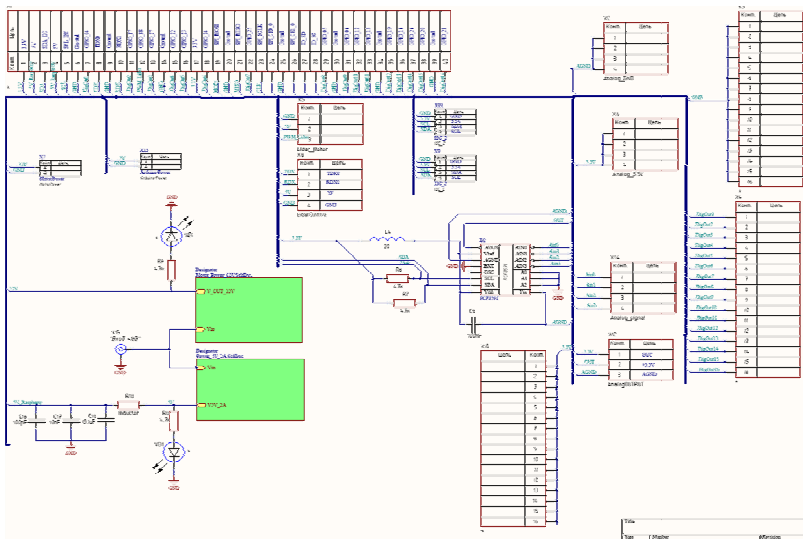


Рис. 4. Принципиальная схема модуля

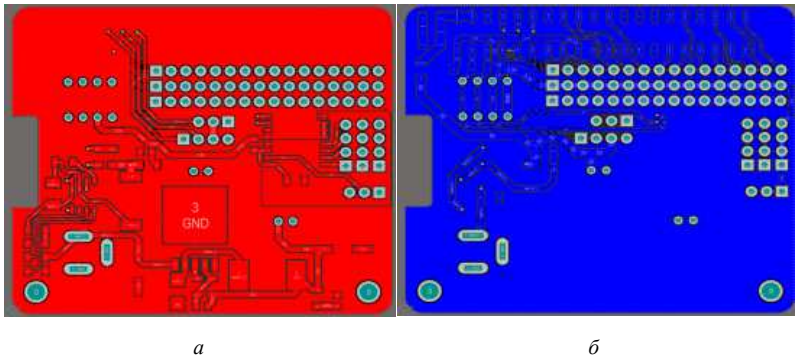


Рис. 5. Верхний (а) и нижний (б) слои проводников на модуле

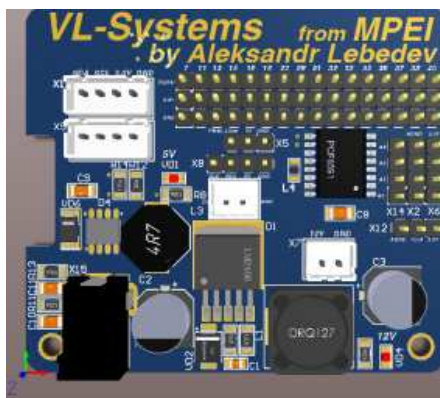


Рис. 6. Внешний вид готового модуля

Внешний вид готовой платы показан на рис. 6.

После монтажа всех компонентов ошибок не было обнаружено. Можно сделать вывод, что все расчеты были верны и топология выполнена правильно. Данный модуль уже прошел испытания на одном мобильном роботе, и можно сделать вывод о его пригодности для построения других мобильных роботов на базе микрокомпьютера Raspberry Pi3. Разработка электрической схемы и печатной платы данного модуля была выполнена в САПР Altium Designer 17 [5].

Библиографический список

1. Reference manual. LM2596. Texas Instruments. – 2016. – 45 с.
2. Reference manual. MP1593. MonolithicPower. – 2013. – 13 с.
3. Reference manual. PCF8591. NXP Semiconductors. – 2013. – 31 с.
4. Джонсон Г., Грэхем М. Конструирование высокоскоростных цифровых устройств: начальный курс черной магии. – М.: Вильямс, 2006. – 436 с.
5. Сабунин А.Е. Altium Designer: Новые решения в проектировании электронных устройств / Солон-Пресс. – М., 2009. – 426 с.

Сведения об авторе

Лебедев Александр Васильевич – студент Московского энергетического института, инженер-конструктор 3-й категории радиосектора отдела морских систем АО «НИИИ», г. Балашиха, e-mail: thenewage7@yandex.ru

С.В. Митрофанов, А.С. Рыжков

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ТРЕХЛОПАСТНОГО ВЕТРОГЕНЕРАТОРА

Приведены сведения о ветрогенераторах, а также об автоматизированных системах управления ветрогенераторами.

Ключевые слова: ветроэнергетика, ветрогенератор, трехлопастной ветрогенератор, система управления.

S.V. Mitrofanov, A.S. Ryzhkov

DEVELOPMENT OF AN AUTOMATED POWER SYSTEM OF A THREE-BLADED WIND GENERATOR

The paper presents information about wind generators, as well as automated control systems of wind turbines.

Keywords: wind power, wind generator, three-bladed wind generator, control system.

Цели статьи – представить сведения о трехлопастном ветрогенераторе, описать принцип его работы, раскрыть сущность автоматизированной энергетической системы трехлопастного ветрогенератора.

Задачи статьи:

1. Описать устройство, принцип работы, преимущества и недостатки трехлопастного ветрогенератора, а также обосновать применяемое количество лопастей.
2. Дать анализ возможности применения трехлопастных ветрогенераторов в Оренбургской области.
3. Охарактеризовать способ автоматизации контроля параметров ветрогенератора.
4. Сформулировать выводы.

Ветрогенератор – это устройство, преобразующее энергию ветра в электроэнергию. Ветер вращает лопасти, которые, в свою очередь, вращают вал, передающий усилие на другие элементы механизма. Трехлопастной ветрогенератор имеет горизонтальную ось вращения. Такая конструкция (рис. 1) является наиболее распространенной на рынке [2]. Номинальная мощность данных установок варьируется от

нескольких сотен ватт до 8 МВт. Этой мощностью обладает ветроустановка компании VESTAS V164-8.0 MW [1]. Высота ее мачты составляет 140 м, а длина крыла 80 м.

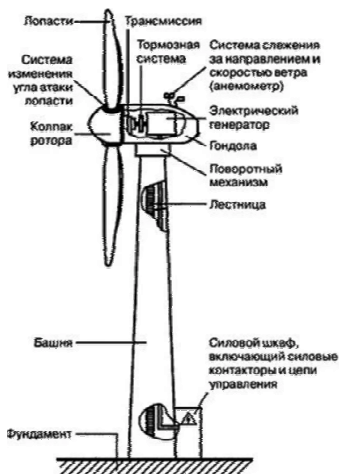


Рис. 1. Устройство ветрогенератора

Преимущества ветрогенераторов горизонтального типа: высокий КПД, большие обороты, широкий диапазон номинальной мощности, распространенность на рынке, меньшие масса и габариты относительно ветрогенераторов с вертикальной осью вращения.

Недостатки: необходимость ориентации на направление ветра; шум, вибрация.

Применение трехлопастных ветрогенераторов обусловлено промышленными масштабами, так как их установка требует большой территории и высокой мачты (не менее 6 м). Такие ветряки начинают вращаться от ветра скоростью 3,5 м/с. Максимальный КПД достигается при скорости ветра 12 м/с.

Формула расчета мощности трехлопастного ветрогенератора

$$P = 0,6(\pi r^2)v^3, \quad (1)$$

где P – расчетная мощность, кВт; r – расстояние от центральной точки ротора до края лопасти, м; v – средняя скорость, м/с.

Ветрогенератор RX-1000НЗ номинальной мощностью 1000 Вт требуется установить в Оренбургской области. Минимальная скорость ветра, необходимая для начала работы генератора, – 2 м/с. Номинальная скорость ветра – 12 м/с.

По формуле (1) рассчитаем мощность ветрогенератора на каждый месяц с учетом ветровой картины региона и сведем результаты в таблицу. Для января:

$$P = 0,6(\pi 0,95^2)6^3 = 0,367 \text{ кВт.}$$

Средние скоростные показатели ветра в Оренбургской области представлены в таблице.

Средние скоростные показатели ветра в Оренбургской области

Месяц	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Год
Средняя скорость ветра, м/с	6	6,25	6	5,6	5,9	5	4,4	4,5	5,1	5,7	5,75	6	5,5
Мощность ВУ, кВт	0,367	0,415	0,367	0,299	0,349	0,213	0,145	0,155	0,226	0,315	0,323	0,367	0,283

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод о невысокой эффективности данного ветрогенератора в регионе. Однако данный ветрогенератор опционально поставляется с солнечной панелью, которая при их совместном использовании увеличит эффективность установки. Для примера возьмем солнечную панель мощностью 500 Вт.

В Оренбургской области в году в среднем, с учетом пасмурных дней, около 200 солнечных дней. Делаем вывод, что в среднем в сутках 5,5 ч светит солнце. Мощность солнечной панели составит около 2 кВт/сут. Данная энергоустановка (рис. 2) позволяет обеспечить потребителю стабильное электроснабжение благодаря двум источникам энергии.

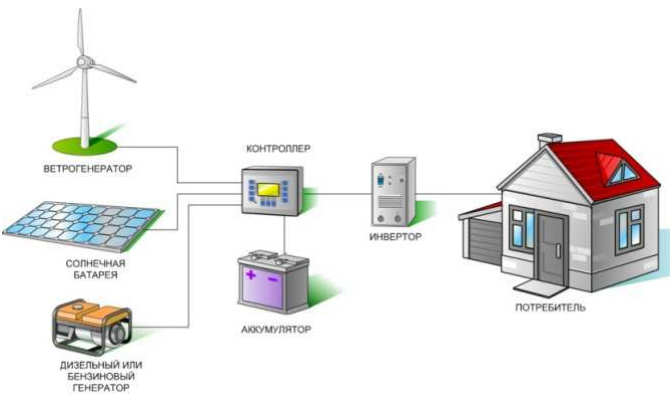


Рис. 2. Гибридная энергетическая установка

Мощности такой гибридной электроустановки будет достаточно, чтобы получали питание: холодильник, электрический чайник, микроволновая печь и светодиодные лампы. Гибридный микропроцессорный контроллер позволяет эффективно заряжать и защищать аккумуляторы от разряда, также контроллер осуществляет автоматизированный контроль параметров ветрогенератора.

Ветрогенератор RX-1000H3 имеет электромагнитную тормозную систему, а также автоматический регулятор угла атаки для избежания перегрузок лопастей.

Рассмотрим сложности, возникающие при управлении ветрогенераторами. Из-за обледенения лопастей и других частей генератора увеличивается масса лопастей, в результате этого промышленные контроллеры системы автоматического управления не способны будут обеспечить эффективность работы ветрогенератора. Несмотря на применение специальных морозостойких материалов и жидкостей, могут замерзнуть приборы, измеряющие скорость ветра, в результате чего могут показывать скорость, не соответствующую действительности. При резких колебаниях скорости ветра срабатывает электрическая защита аппаратов, входящих в состав системы, что также снижает эффективность системы в целом. В большинстве промышленных ветрогенерирующих установок стоят асинхронные генераторы, стабильная работа которых зависит от постоянства напряжения на ЛЭП. Для обеспечения стабильной работы этих генераторов следует применять гибридные контроллеры. В развитие методов систем управления условно выделены три этапа, которые связаны с понятием детерминизма, стохастичности и адаптивности.

Методы классической теории управления для синтеза систем автоматического управления, принадлежащие этапам детерминизма и стохастичности, эффективно применяются для управления хорошо формализуемыми объектами с очевидными свойствами, что ограничивает область применения классической теории управления существованием априорной неопределенности относительно свойств объекта управления. Методы классической теории управления предполагают, что все неизвестные параметры объекта управления можно идентифицировать и измерить без потери точности работы системы управления, что не всегда выполнимо.

В качестве альтернативы классическим адаптивным системам возник подход к синтезу систем автоматического управления,

именуемый робастным. Понятие робастности подразумевает наличие регулятора, множества параметров ОУ, фиксацию определенной характеристики объекта управления. Робастный регулятор должен обеспечивать приемлемое качество управления согласно выбранному заранее критерию при любых возможных значениях параметров объекта управления. Требования, предъявляемые к системам автоматического управления, опыт их синтеза в условиях недостатка априорной информации об объекте управления, возможность использования опыта экспертов в предметной области, способность адаптироваться к изменениям объекта управления делают целесообразным объединение математических аппаратов нечетких множеств, нечеткой логики и искусственных нейронных сетей в методах синтеза гибридных регуляторов [3].

Ветрогенераторы являются перспективными источниками энергии, однако их цена довольно высока. Эффективность их использования сильно зависит от региона. Однако отлаженные гибридные системы электроснабжения уже являются полноценной заменой традиционной системы электроснабжения, а с помощью систем автоматизации использование ветряков становится более практичным и удобным.

Библиографический список

1. Применение промышленных ветрогенераторов [Электронный ресурс]. – URL: <https://tcip.ru/blog/wind/primenenie-promyshlennyh-vetrogeneratorov.html> (дата обращения: 20.03.2019).
2. Ветрогенераторы. Устройство и виды. Работа и применение [Электронный ресурс]. – URL: <https://electrosam.ru/glavnaja/jelektro-oborudovanie/jelektropitanie/vetrogeneratory> (дата обращения: 19.03.2019).
3. Проявление неопределенности при управлении ветроэнергетическими установками [Электронный ресурс]. – URL: <http://eef.misis.ru/sites/default/files/lectures/4-4-1.pdf> (дата обращения: 25.01.2019).

Сведения об авторах

Митрофанов Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электро- и теплоэнергетика» Оренбургского государственного университета, г. Оренбург.

Рыжков Александр Сергеевич – магистрант Оренбургского государственного университета, гр. 3-18ЭЭ(м)АЭСК, г. Оренбург.

А.В. Казаков, А.Н. Коломейцев

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБДУВА РАДИАТОРОВ

Рассмотрена численная модель и результаты расчета процесса тепло-массопереноса системы активного воздушного охлаждения внутри корпуса электротехнического устройства.

Ключевые слова: численное моделирование, охлаждение, тепломассоперенос.

A.V. Kazakov, A.N. Kolomeytsev

MODELING OF THE RADIATOR BREAK PROCESS

This article discusses the numerical model and the results of the calculation of the process of heat and mass transfer of the active air cooling system inside the housing of an electrical device.

Keywords: numerical simulation, cooling, heat and mass transfer.

В процессе разработки новых и совершенствования уже существующих радиоэлектронных устройств зачастую возникает вопрос об их нагрузочной способности. В частности, весьма актуальным является проблема отвода мощности от полупроводниковых приборов. Выделяемое тепло необходимо быстро рассеивать в окружающую среду из-за малых размеров и небольшой теплоемкости кристалла полупроводника.

На сегодняшний день наибольшее распространение получили два способа охлаждения радиаторов: естественная и принудительная конвекции. Гораздо лучших технико-экономических показателей прибора позволяет достичь применение активных систем охлаждения, наиболее простыми из которых являются вентиляторы, создающие направленные потоки воздуха внутри корпуса радиоэлектронного устройства. Подобные задачи весьма часто решаются численными методами в специализированных программных пакетах [1, 2].

Для оценки возможности применения в конструкции вентиляторов различных производителей были исследованы две модели вентиляторов типоразмера 40×40×10 мм. Оба вентилятора обладают схожими характеристиками. Для проверки достоверности сведений,

предоставленных производителями вентиляторов, был запланирован эксперимент, заключающийся в определении скорости воздушного потока каждого образца.

Для удобства заявленные и измеренные характеристики исследуемых вентиляторов были сведены в таблицу.

Заявленные и измеренные параметры вентиляторов

Модель вентилятора	Заявленный ток, А	Измеренный ток, А	Заявленный расход, м ³ /с	Измеренный расход, м ³ /с
Модель 1	—	0,066	3,31·10 ⁻³	2,10·10 ⁻³
Модель 2	0,12	0,070	1,45·10 ⁻³	1,54·10 ⁻³

При моделировании были сделаны следующие упрощающие допущения: задача стационарная, тепло от радиаторов отводится только за счет конвекции (не учитывается излучение), не учитывается естественная конвекция, теплофизические свойства материала радиаторов и воздуха постоянны.

Математическая модель процесса тепломассопереноса представляет собой совокупность уравнений состояния, записанных для воздуха и радиаторов (нижний индекс «р» в уравнении (5)) [3]:

$$\left\{ \begin{aligned} \rho \left(v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \\ \rho \left(v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z}; \\ \rho \left(v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0; \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \tau_{xx} &= 2\mu \frac{\partial v_x}{\partial x}; \quad \tau_{yy} = 2\mu \frac{\partial v_y}{\partial y}; \quad \tau_{zz} = 2\mu \frac{\partial v_z}{\partial z}; \\ \tau_{xy} = \tau_{yx} &= \mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right); \quad \tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right); \\ \tau_{zx} = \tau_{xz} &= \mu \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right); \end{aligned} \quad (3)$$

$$C_p \left(v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \lambda \Delta T ; \quad (4)$$

$$C_p \rho_p = \lambda_p \Delta T , \quad (5)$$

где x , y и z – декартовы координаты; v_x , v_y и v_z – компоненты вектора скорости; P – давление; T – температура; ρ – плотность; C – теплоемкость; λ – теплопроводность; μ – вязкость воздуха (с индексом «р» – плотность, теплоемкость и теплопроводность радиатора); τ_{ij} – компоненты тензора напряжения.

На входе в корпус задавалась температура окружающей среды и измеренный ранее расход воздуха от вентилятора. На жалюзи – нулевой тепловой поток. На остальных стенках, образующих корпус, задавались нулевые компоненты скорости и условия конвективного теплообмена с окружающей средой. На обдуваемых поверхностях радиаторов – нулевые компоненты скорости, равенство температур радиатор–воздух.

Численное решение системы уравнений (1)–(5), дополненной граничными условиями и свойствами материалов радиаторов и воздуха, происходило в среде инженерного конечно-элементного анализа Ansys Fluent. Модель содержала 4,5 млн элементов. На рис. 1 представлены некоторые фрагменты сетки. Зеленым цветом отмечены радиаторы, серо-зеленым – контактные площадки полупроводников.

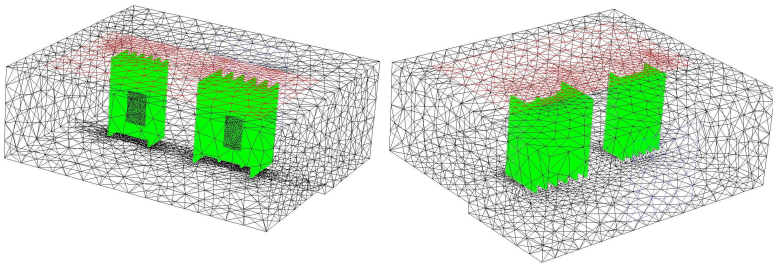


Рис. 1. Разбиение модели на сетку конечных элементов

Признаком окончания счета в данном случае была выбрана стабилизация тепловых потоков, отводимых из полупроводниковых приборов в радиаторы и далее снимаемых с радиаторов воздушным потоком (Орис. 2). Здесь RHC-01 – радиатор большего размера.

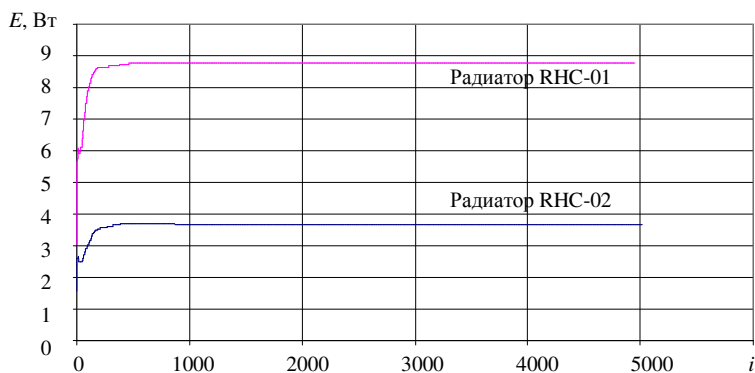


Рис. 2. Зависимость теплового потока E от итераций i

Для расчета были заданы предельные ограничения в 80 и 60 °C на поверхностях прилегания радиаторов. Соответствующие им потоки составили 8,77 и 3,67 Вт для RHC-01 и RHC-02 соответственно. При этом с поверхности самого элемента, обращенной от радиатора, энергии отводилось на порядок меньше (0,13 и 0,03 Вт), что позволяет пренебречь этой составляющей теплоотвода.

Для оценки температур внутри корпуса было выведено поле температур, фрагмент которого представлен на рис. 3. Хорошо заметна деформация поля, образующаяся в результате увлечения нагретых масс воздуха внутри корпуса набегающим потоком, создаваемым вентилятором.

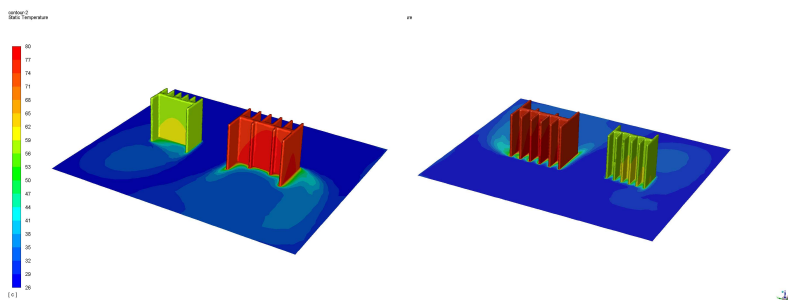


Рис. 3. Поле температур внутри корпуса

В результате проведения данного исследования были определены предельные параметры нагрузки, с которыми без фатальных последствий способны справиться штатные средства охлаждения ис-

следуемого устройства. Предложенная математическая модель и методика ее реализации дополнительно позволяют произвольно менять внешние условия эксплуатации, давая однозначное представление о поведении устройства при его работе, например в иных температурных или климатических поясах. Такие данные являются необходимыми для понимания критических условий работоспособности радиоэлектронных устройств, оценки его надежности, а также для обоснования необходимости модернизации существующих систем охлаждения.

Библиографический список

1. Применение методов компьютерного моделирования для подбора радиаторов охлаждения полупроводниковых преобразователей энергии / В.Е. Вавилов, Д.Р. Фаррахов, А.А. Меднов, А.Х. Минияров // Энергетические и электротехнические системы: междунар. сб. науч. тр. / под ред. С.И. Лукьянова, Н.В. Швидченко. – Магнитогорск, 2015. – С. 70–74.
2. Трофимов В.Е., Павлов А.Л., Мокроусова Е.А. CFD-моделирование радиатора для воздушного охлаждения микропроцессоров в ограниченном пространстве // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2016. – № 6. – С. 30–35.
3. Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А. Тепломассообмен. – М.: Изд-во МЭИ, 2005. – 550 с.

Сведения об авторах

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

Коломейцев Алексей Николаевич – бакалавр Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. МЭ-15-16, г. Пермь, e-mail: ktei@mail.ru

Р.О. Токарев, В.В. Шапошников, Э.В. Любимов

**ЭСКИЗНЫЙ ПРОЕКТ АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ДЛЯ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ
ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЮЖНОЙ ЧАСТИ ПЕРМСКОГО
КРАЯ (РАЙОН ЧЕРНУШКИ)**

Рассмотрен проект автономной системы электроснабжения для Пермского края (район Чернушки). Подобрана система электроснабжения с потребляемой суммарной энергией в неделю 1000 кВт·ч. Учтен вопрос импортозамещения и невозможности подключения к общей сети электроснабжения, находящейся на расстоянии 20 км от потребителя, без постройки ЛЭП 6 кВ. Определены затраты на строительство ЛЭП, оплату подключения ЛЭП к государственной сети и приведено сравнение их с затратами на автономную систему.

Ключевые слова: проект, система электроснабжения, автономная система, схема электроснабжения ветрогенератора, солнечные панели, аккумуляторные батареи, инвертор, бензиновый генератор, система пуска.

R.O. Tokarev, V.V. Shaposhnikov, E.V. Lubimov

**CONCEPTUAL DESIGN OF AUTONOMOUS POWER SUPPLY
SYSTEM FOR INDIVIDUAL CONSUMERS OF THE SOUTHERN
PART OF THE PERM REGION (CHERNUSHKA DISTRICT)**

This paper considers the project of autonomous power supply system for the Perm region (Chernushka district). The system of power supply with total energy consumed in a week of 1000 Kw·H is picked up. This paper takes into account the issue of import substitution and inability to connect to a common power supply network located at a distance 20 km from the consumer without the construction of transmission line 6 kV. The costs for the construction of power LINES, for payment of connection of power lines to the state network are determined and their comparison with the cost of the autonomous system is given.

Keywords: project, power supply system, autonomous system, power supply scheme wind generator, solar panels, rechargeable batteries, inverter, gasoline generator, start-up system.

Проект автономной системы электроснабжения для потребителей южной части Пермского края (район Чернушки) с потребляемой суммарной энергией в неделю 1000 кВт·ч. Система электроснабжения состоит из комплекта солнечных панелей, аккумуля-

ляторной батареи, солнечного контроллера заряда АКБ, инвертора, ветрогенератора, вспомогательного бензинового или дизельного генератора и системы его автоматического пуска¹.

В проекте обоснован выбор всех устройств, составлена схема электроснабжения, определена стоимость основного оборудования.

В работе учтен вопрос импортозамещения и невозможность подключения к общей сети электроснабжения, находящейся на расстоянии 20 км от потребителя, без постройки ЛЭП 6 кВ. Определены затраты на строительство ЛЭП, оплату подключения ЛЭП к государственной сети и приведено сравнение их с затратами на автономную систему. Поскольку ближайшая сеть электроснабжения находится на расстоянии 20 км от объекта и при этом отсутствует возможность подключения к ней, рассчитываемая система будет полностью автономной. Для выбора оборудования необходимо знать значение суммарной потребляемой энергии в день и значение суммарной потребляемой энергии в час – это будет 143 и 6 кВт/ч соответственно.

Средняя скорость ветра в Чернушке в течение года приведена на рис. 1, эта информация нужна для выбора нашего ветрогенератора.

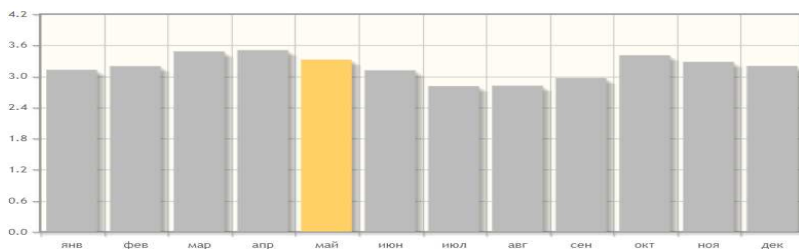


Рис. 1. Средняя скорость ветра в Чернушке в течение года

Среднее значение скорости ветра за год 3,18 м/с [7, 8]. Поскольку для района Чернушки характерно низкое значение скорости ветра, необходимо выбрать ветроустановку небольшой мощности [1].

Выбираем ветроустановку ВЭУ1/2.8 (рис. 2). Характеристики выбранной ветроустановки приведены ниже:

¹ Любимов Э.В. Учебные материалы к дисциплине «Системы управления энергоресурсами». 2015.

Фирма-производитель, страна	ООО «Ветрострой», Россия
Номинальная мощность, Вт	1000
Номинальное напряжение, В	24
Скорость ветра, при которой начинается работа, м/с	3
Количество лопастей	1
Диаметр ветроколеса, м	2.8
Цена	24 000 руб.
Мачтовый комплект 8 м	10 000 руб.



Рис. 2. Внешний вид установки ВЭУ1/2.8

При средней скорости ветра 3,18 м/с ветроустановка вырабатывает мощность 130 Вт (см. рис. 2). Таким образом, среднее значение вырабатываемой энергии в сутки составит 3,12 кВт·ч, оставшиеся 139,88 кВт·ч энергии будут вырабатываться при использовании солнечной энергии [2].

Далее производим расчет солнечной электростанции. Среднее годовое значение солнечной радиации за день составляет 2,92 кВт·ч/м².

Заявленная потребляемая мощность объекта – 1000 кВт·ч в неделю.

Технические характеристики выбранных солнечных панелей TSM-230SB приведены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики солнечных панелей TCM-230SB

Модель	Фирма-производитель, страна	Мощность, Вт	КПД, %	U_{xx} , В	$U_{\max}$, В	$I_{\max}$, А	Габариты, мм	Вес, кг
TCM-230SB	«Телеком-СТВ», Россия	230	18	44	38	6	1578×815×40	15,4

Расчет количества солнечных модулей будем производить для двух последовательно соединенных модулей, образующих одну линейку, по формулам²:

Площадь активной части:

$$1578 \cdot 815 = 1\,286\,070 = 1,28 \text{ м}^2.$$

Возможная получаемая энергия за день:

$$2,92 \cdot 0,18 = 0,526 \text{ кВт/м}.$$

Площадь для двух последовательно соединенных модулей:

$$1,28 \cdot 2 = 2,56 \text{ м}^2.$$

Энергия, получаемая с линейки:

$$2,56 \cdot 0,526 = 1,35 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Производим выбор солнечного контроллера заряда АКБ. Выбираем значения данного контроллера исходя из входного напряжения 48 В. Рассчитываем емкость аккумулятора с учетом работы от АКБ в течение 8 ч:

$$Q = (Pt) / Vk,$$

где Q – необходимая емкость аккумулятора, А·ч; P – имеющаяся нагрузка, Вт; V – напряжение каждой аккумуляторной батареи, В; t – время резервирования, ч; k – коэффициент использования емкости аккумуляторов;

$$Q = (6000 \cdot 8) / 12 \cdot 0,7 = 6 \text{ кА} \cdot \text{ч}.$$

Исходя из необходимой емкости (6 кА·ч) выбираем аккумулятор Giver 225. Требуемая емкость составляет 6 кА·ч, а емкость выбранного аккумулятора составляет 225 А·ч.

² Любимов Э.В. Учебные материалы к дисциплине «Системы управления энергоресурсами». 2015. Сборник укрупненных показателей стоимости строительства (реконструкции) подстанций и линий электропередачи для нужд ОАО «Холдинг МРСК». М., 2012. 71 с.

С целью возможности заряда аккумулятора от солнечного контроллера на напряжение 48 В необходимо соединить последовательно четыре аккумулятора. Для того чтобы обеспечить возможность работы нагрузки, рассчитанной на переменное напряжение, необходимо использовать инвертор. В качестве инвертора выбираем инвертор МАП SIN «Энергия» Pro 48 В: 6 кВт.

Для резервирования энергии и обеспечения автономной работы необходимо использование бензинового генератора. В качестве дизельного генератора выбираем модель Mustang CTG11000. Выбор дизельного генератора производим по мощности исходя из требуемой мощности 6 кВт, а также исходя из напряжения, необходимого для подключения нагрузки [4].

В целях обеспечения возможности заряда аккумулятора от бензогенератора необходимо использовать выпрямитель. В качестве выпрямителя выбираем ИПС-1200-220/48В-25А-2U [3]. Для обеспечения возможности автоматического включения генератора необходимо использовать контроллер БГУ. В качестве контроллера выбираем К-60 (фирма-производитель НЗГУ, Россия). Микропроцессорный контроллер управления работой БГУ не имеет ЖК-дисплея, вследствие чего может применяться при очень низких температурах воздуха. Отображение информации полностью на русском языке. Гибкая система настройки с помощью программного обеспечения. Может использоваться для управления БГУ вплоть до 4-й степени автоматизации. Схема автономной системы энергоснабжения приведена на рис. 3.



Рис. 3. Схема автономной системы энергоснабжения

Все использованное оборудование было выбрано от российских производителей с целью импортозамещения (табл. 2).

Таблица 2

Расчет стоимости основного оборудования
с учетом импортозамещения

Наименование	Цена	Кол-во	Цена
Ветровая электростанция ВЭУ1/2.8	34 000	1	34 000
Солнечные модули	29 777	160	4 764 320
Контроллер заряда Есо Энергия Pro	34 450	80	2 756 000
Аккумуляторная батарея Giver 225	11 700	4	46 800
Инвертор МАП SIN	46 900	1	46 900
Бензиновый генератор Mustang CTG11000	100 000	1	233 690
Выпрямитель ИПС-1200-220/48В-25А-2U	36 000	1	36 000
Контроллер К-60	11 600	1	39 000
Сумма			7 811 459

В качестве подтверждения нашего проекта необходимо рассчитать альтернативный вариант подключения к сети ЛЭП и сравнить их по стоимости³.

При расчете всех технических показателей, технико-экономических показателей ВЛ 6 кВ, затрат на строительство ВЛ 6 кВ, в том числе на строительство воздушных линии 6 кВ на деревянных опорах, прочих затрат общие капитальные вложения для альтернативного варианта подключения к сети ЛЭП составляют 19 668,8 тыс. руб.

В заключение нашего проекта можно отметить:

- оборудование для автономной электростанции требует меньших капиталовложений;
- исключает неудобства, вызванные плановыми ремонтами ЛЭП;
- не требуется оплачивать электроэнергию;
- использование возобновляемых источников энергии позитивно отражается на состоянии окружающей среды.

³ Сборник укрупненных показателей стоимости строительства (реконструкции) подстанций и линий электропередачи для нужд ОАО «Холдинг МРСК». М., 2012. 71 с.

Библиографический список

1. Производство и продажа энергооборудования [Электронный ресурс]. – URL: <http://ru-transformator.ru/ktp-vs-price/ktp-vs-4-6-215.html>] (дата обращения: 21.04.2019).
2. Энергетические технологии [Электронный ресурс]. – URL: <https://newet.ru/catalog/vypryamiteli-i-vypryamitelnye-sistemy-forpost-s-vyhodnym-napryazheniem-48-v/vypryamitel-ips-1200-220-48b-25a-2u> (дата обращения: 21.04.2019).
3. Аккумуляторная компания [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.haze.ru/> (дата обращения: 21.04.2019).
4. Генераторы и электростанции [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.generatora.net/cat/generators/petrol1/huter/mustang-CTG11000/> (дата обращения: 11.05.2019).
5. Электроветер [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.electroveter.ru/vetrogenerator-1-kvt.html> (дата обращения: 21.04.2019).
6. Погода в России [Электронный ресурс]. – URL: <http://russia.pogoda360.ru/714464/may/> (дата обращения: 21.04.2019).

Сведения об авторах

Токарев Роман Олегович – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ЭМ-18-1м, г. Пермь, e-mail: jul1071996@yandex.ru

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

Любимов Эдуард Викторович – кандидат технических наук, профессор кафедры «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: lis.pstu@mail.ru

А.В. Казаков, Д.Р. Никитин

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И АЛГОРИТМОВ РАСЧЕТА МАРШРУТОВ ВОЛОЧЕНИЯ

Рассматривается разработка методики и алгоритмов расчета маршрутов волочения.

Ключевые слова: волочение, теплопроводящие жилы.

A.V. Kazakov, D.R. Nikitin

DEVELOPMENT OF METHODS AND ALGORITHMS FOR CALCULATION OF TRAINING TRAINS

In this article, the development methods and algorithms for calculating the routes of drawing are available.

Keywords: drawing, conductors.

Современная промышленность немыслима без электричества и средств его доставки от места выработки к конечному потребителю. Исходя из этого остается актуальной тематика, связанная с разработкой и изготовлением кабелей и проводов на высокое и среднее напряжение, а именно изготовление токопроводящих жил.

Жилы таких кабелей могут быть как наборными (состоящими из множества отдельных проводников), так и цельными. Однако в любом случае что отдельным проволокам, что жилам целиком придается специальная форма. Это может быть как простая форма (круг, прямоугольник), так и более сложная фасонная (сектор, z-образный или, например, стреловидный профиль). Исходным сырьем для производства таких проволок является медная или алюминиевая катанка стандартных размеров, обычно круглого сечения. Основной способ изготовления – волочение. При этом исходная заготовка последовательно протаскивается через ряд профильных волок с уменьшающейся площадью окна. Форма и размеры заготовки постепенно приближаются к требуемому профилю. Волочение является процессом пластической деформации, при этом величина возникающих внутри заготовки напряжений может привести к обрыву. Ввиду этого целесообразно

заранее знать профили волок, которые, с одной стороны, позволят избежать обрывов заготовки в процессе, а с другой – сократить количество волок, снизив тем самым себестоимость производства.

Для профилей простой формы существуют аналитические приближенные выражения и таблицы [1–5], позволяющие оперативно прикинуть геометрию промежуточных профилей волок и их количество. Однако для более сложных форм маршруты волочения приходится подбирать непосредственно на действующем оборудовании. При этом к стоимости самого процесса добавляется как цена материала (а при обрыве его часть уходит в отходы), так и стоимость изготовления волокна (изготовить волоку сложного профиля намного затратнее, чем, скажем, круглого).

Таким образом, существует реальная потребность в предварительном расчете количества и профилей волок. Этому посвящен ряд работ [5–8]. Рассмотренные работы не затрагивают вопрос расчета маршрута волочения сложных профилей, например стреловидного (рис. 1) и z-образного (рис. 2), который применяется в проводах AERO-Z, AAACZ, AAAC UHC, GZTACSR и т.д.



Рис. 1. ТПЖ с использованием профилей стреловидной формы



Рис. 2. ТПЖ с использованием профилей z-образной формы

Предварительный анализ проблемы показал, что применять стандартные методики для таких профилей невозможно, так как результаты сильно отличаются от истины. Таким образом, целью данной работы является разработка алгоритма, позволяющего определить маршрут волочения проволоки произвольной конфигурации из заготовки произвольной формы. Для этого необходимо решить ряд задач: организовать процедуры ввода формы и размеров заготовки

и требуемого профиля готовой проволоки, рассчитать профили промежуточных волок, оценить степень деформации от волокна к волоку.

Для ввода профиля заготовки или конечной проволоки был предложен координатный способ. При нем сложный профиль контура разбивается на ряд узловых точек. Таким образом, весь криволинейный профиль заменяется набором аппроксимирующих прямых, вписанных образующими узлами внутрь исходного. Для более точного описания фигур сложных конфигураций предусмотрено произвольное задание количества узловых точек. На данном этапе ввод массива точек производится через текстовый файл, однако в дальнейшем для удобства конечного пользователя предусматривается возможность сканирования, распознавания и автоматического разбиения предварительно напечатанного в масштабе эскиза. В процессе ввода узловых точек начального и конечного профилей происходит перевод декартовых двумерных координат в цилиндрическую систему r - ϕ , в которой происходят дальнейшие преобразования и расчеты. Затем у исходного и результирующего профилей определяются геометрические центры (это необходимо для базирования всех промежуточных профилей волок), после чего фигуры приводятся к одной системе координат.

Следующим этапом производится распределение траекторий деформирования. В данном случае под этим термином подразумевается траектория смещения конкретной точки от волокна с большим проходным сечением к волоку с меньшим проходным сечением (рис. 3).

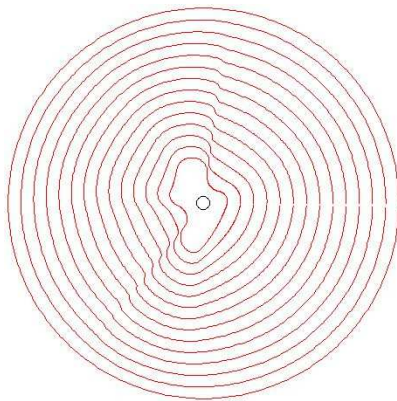


Рис. 3. Траектория смещения от большей
волоки к меньшей

На данном этапе проектирования для упрощения процедуры распределения траекторий принято допущение, что количество узловых точек исходного и результирующего контуров одинаково, а угловая координата их смещения постоянна. В более поздних версиях алгоритма это допущение будет устранено путем формирования контуров непосредственно самой программой.

После определения траекторий деформирования необходимо определить количество волочений. Анализ требований заводов, планирующих использовать данные методики, показал, что не всегда нужно эту величину рассчитывать. Зачастую предприятие уже обладает конкретным волочильным оборудованием, и требования к количеству волок диктуются не минимально возможным их количеством, а параметрами оборудования. Ввиду этого наряду с автоматическим определением требуемого количества волок предусмотрен еще и ручной ввод этого параметра. Предварительный автоматический расчет основан на заранее заданном предельном обжати и отношении площадей поперечного сечения исходной и результирующей заготовок. После предварительного определения количества требуемых волок каждая траектория деформирования разбивается на серию дополнительных узлов, определяющих промежуточные профили деформирования.

Для формализации признаков рационального деформирования было введено два параметра – минимизация совокупной длины траекторий деформирования и монотонность уменьшения периметра контура от исходной заготовки к результирующему профилю готовой проволоки. Первый параметр рассчитывается и проверяется на этапе распределения траекторий деформирования. Второй – после разбиения траекторий деформирования на промежуточные узлы.

Помимо вышеперечисленных параметров дополнительно производится сравнение исходной и результирующей площадей на каждом обжати, при необходимости в координаты узлов рассчитанного профиля вносятся поправки. Стоит заметить, что проверка обжати по отношению к площадям корректно работает только в случае деформации проволоки круглого сечения. Формализовать данный признак можно путем сравнения периметра каждого профиля с длиной окружности, имеющей ту же площадь сечения, что и рассматриваемый профиль. В дальнейшем планируется ввести в алгоритм такую проверку и корректировать получаемое обжатие неким экспериментально определенным коэффициентом.

Если на каком-либо этапе обнаруживается необходимость коррекции количества волок в большую сторону, происходит увеличение этого количества на единицу, цикл расчетов повторяется.

Помимо контроля максимального обжатия методика предусматривает и проверку минимального уровня этого параметра. Необходимость его контроля связана с технологией волочения, а именно с применением жидких смазок и СОЖ. При недостаточном обжатии может произойти вытекание смазки из зоны деформации, что приводит к обрыву заготовки.

Также для адаптации к существующему оборудованию целесообразно введение ступенчатого изменения площади заготовки. Это тоже является технологической необходимостью, обусловленной фиксированным набором скоростей протяжки заготовки от волокна к волоку на некотором оборудовании. Этот факт накладывает ограничения на скорости заготовки после прохождения конкретной волоки; иными словами, в некоторых случаях площади окон волок (и, как следствие, координаты окна волоки) должны быть рассчитаны не по ранее приведенным критериям, а по возможностям оборудования. Производить такой пересчет предлагается по известным постоянным приращениям (или уменьшениям, в зависимости от необходимости коррекции площади окна волоки) к радиальным координатам узлов образующих профиля.

Еще одним путем усовершенствования данной методики может стать иной алгоритм определения траекторий деформирования, строящий ее не по кратчайшему расстоянию между реперными точками смежных профилей, а учитывающий направление нормали к контуру в данной точке.

К тому же предполагается целесообразным добавление возможности ручного ввода промежуточных профилей волок для оценки возможности применения уже имеющихся на производстве готовых волок.

Таким образом, предлагаемая методика и алгоритмы ее реализации позволяют создать универсальный программный продукт, просчитывающий рациональные контуры профилей волок для произвольной формы заготовки и требуемой проволоки. Его применение позволит существенно сократить время на разработку линии производства нового профиля проволоки, переориентации существующей на другие маркоразмеры или профили.

Библиографический список

1. Константинов И.Л. Основы технологических процессов обработки металлов давлением. – СПб.: Профессия, 2003. – 752 с.
2. Смирягин А.П. Обработка цветных металлов и сплавов. – М.: Металлургиздат, 1961. – 873 с.
3. Хаяк Г.С. Волочение проволоки из цветных металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1967. – 151 с.
4. Костыгова Т.В. Технология производства провода. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2010. – 68 с.
5. Архипов А.И. Методика расчета маршрута многократного волочения с устанавливаемой величиной скольжения / ГГТУ. – Беларусь, 2005.
6. Дмитриева К.Е. Разработка программы для расчетов маршрутов волочения высокоуглеродистой проволоки. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2017 – 59 с.
7. Путилова А.А. Автоматизация маршрута волок для волочения. – Пермь: Изд-во Перм нац. исслед. политехн. ун-та, 2018. – 62 с.

Сведения об авторах

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

Никитин Денис Романович – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КТЭ-18-1м, г. Пермь, e-mail: xden-berz@mail.ru

А.В. Казаков, А.С. Шабловский

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ РАСПЛАВА ПОЛИМЕРА В КАНАЛЕ ЭКСТРУДЕРА В РАЗЛИЧНЫХ ПОСТАНОВКАХ

Рассмотрена математическая модель течения расплава полимера в зоне дозирования шнекового экструдера и ее численная реализация. Проведено сравнение и оценка влияния винтовой геометрии канала и ее развертки на плоскость на температуру в канале. Рассчитано и представлено время пребывания материала внутри канала для различных постановок и свойств исходного и вторично переработанного материала.

Ключевые слова: переработка полимеров, экструзия, реология.

A.V. Kazakov, A.S. Shablovsky

STUDY THE FLOW OF POLYMER MELT IN THE EXTRUDER IN VARIOUS PRODUCTIONS

The article considers a mathematical model of polymer melt flow in the dosing zone of screw extruder and its numerical implementation. The influence of the helical geometry of the channel and its sweep on the plane on the temperature in the channel is compared and evaluated. The residence time of the material inside the channel for different performances and properties of the source and recycled material is calculated and presented.

Keywords: polymer processing, extrusion, rheology.

В настоящее время во многих отраслях промышленности используется экструзия с применением композиций на основе полиэтилена с различными наполнениями: в кабельной, текстильной промышленности, в машиностроении и т.д. В связи с этим остро стоит вопрос использования вторично перерабатываемых полимерных материалов. При применении на производстве таких полимеров необходимо оценить их возможность использования при тех же условиях, что и исходных, сравнить поведение материала в экструдерах.

Цели работы: изучить поведение материала в зоне дозирования шнекового агрегата до и после его переработки, определить время пребывания полимера в зоне дозирования шнекового экструдера.

Объектом исследования является полимер, текущий в канале, образованном шнеком и корпусом экструдера.

Задачи исследования:

- 1) разработать трехмерную математическую модель стационарного процесса тепло-массопереноса полимера внутри канала экструдера в зоне дозирования;
- 2) сравнить модели винтового и развернутого каналов;
- 3) исследовать течение исходного материала после его вторичной переработки.

На рис. 1 представлена часть трехмерного изображения винтового канала экструдера, по которому движется полимер. В дальнейшем будет исследоваться только зона дозирования, составляющая для данного оборудования шесть витков. Для оценки существенности допущения о разворачивании канала на плоскость также была построена модель, представленная на рис. 2.

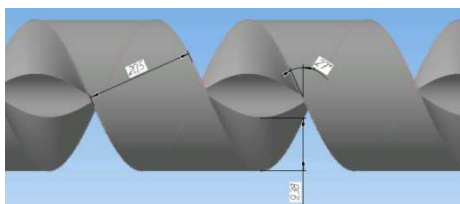


Рис. 1. Геометрия шнека

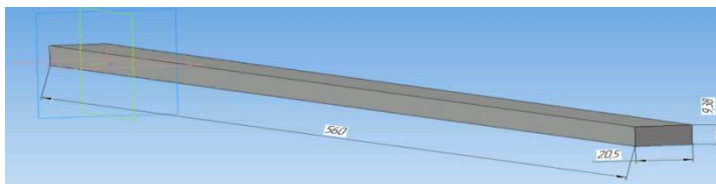


Рис. 2. Геометрия прямоугольного канала

Внешний диаметр шнека (корпуса) 26 мм, шаг винтовой нарезки 36 мм, угол подъема винтовой линии 27° , высота канала 9,38, длина геометрической зоны дозирования – 6 витков.

Геометрия прямоугольного канала: ширина 20,5 мм, высота 9,38 мм, длина канала 560 мм.

Допущения: процесс стационарный, теплофизические характеристики постоянны и не зависят от температуры, используется принцип обращенного движения, массовые силы пренебрежимо малы, расплав – чисто вязкая несжимаемая среда, задается массовый рас-

ход, нет утечек через гребень шнека. Дополнительное допущение для прямоугольного канала: винтовой канал развернут в прямоугольный.

С учетом сделанных допущений система дифференциальных уравнений [1, 2], основанных на законах сохранения, имеет вид

$$\begin{aligned}\rho \left(V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial z} \right) &= - \frac{\partial p}{\partial x} + \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right); \\ \rho \left(V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_y}{\partial z} \right) &= - \frac{\partial p}{\partial y} + \left(\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right); \\ \rho \left(V_x \frac{\partial V_z}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_z}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) &= - \frac{\partial p}{\partial z} + \left(\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right); \\ \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} &= 0, \\ \rho C \left(V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) &= \lambda \Delta T + q_v,\end{aligned}$$

где x, y, z – декартовы координаты; ρ, λ, C – соответственно плотность, коэффициент теплопроводности и теплоемкость; V_x, V_y, V_z – компоненты скорости движения расплава полимера; τ – компоненты дивергента тензора напряжений; P – давление; T – температура.

Граничные условия определяются из условия прилипания к твердым непроницаемым поверхностям.

$T_{\text{выход}} = 225^\circ\text{C}$; $T_{\text{шнека}} = 210^\circ\text{C}$; $T_{\text{корпус}} = 200^\circ\text{C}$ [2], на выходе $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$. Массовый расход на входе 0,05 кг/мин. Скорость движения корпуса для развернутого канала $V_x = 0,0115$ м/с; $V_y = 0,006$ м/с, остальные скорости для твердых поверхностей равны нулю. Скорость движения корпуса спирального канала $V_r = 0$; $V_z = 0$; $V_\phi = 50$ об/мин.

Теплофизические и реологические свойства перерабатываемой композиции на основе полиэтилена низкой плотности представлены в таблице [3–5].

Реологические и теплофизические свойства полимера до и после переработки

Параметр	Величина	
	до переработки	после переработки
Плотность ρ , кг/м ³	779	760
Коэффициент удельной теплоемкости C , Дж/кг·К	2985	2888
Коэффициент теплопроводности λ , Вт/м·К	0,182	0,175
Коэффициент консистенции μ_0	23901	23890
Температурный коэффициент вязкости β	0,0148	0,0078
Показатель аномалии вязкости n	0,34	0,34

Для каждой из построенных геометрий было численно произведено исследование процесса тепломассопереноса. На рис. 3 представлен график распределения значений температуры по длине прямоугольного канала при использовании материала до и после переработки.

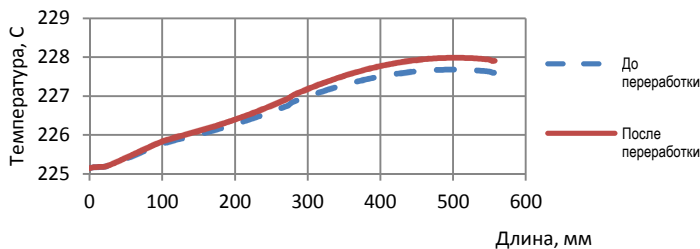


Рис. 3. Распределение значений температуры по каналу для разных материалов

Сравнение двух кривых показывает максимальное расхождение результатов в 0,13 %, что объясняется изменением свойств материала, попаданием в него примесей.

После моделирования прямоугольного канала был рассчитан спиральный канал. Поле температур представлено на рис. 4, стрелкой показано направление движения полимера в шнеке.

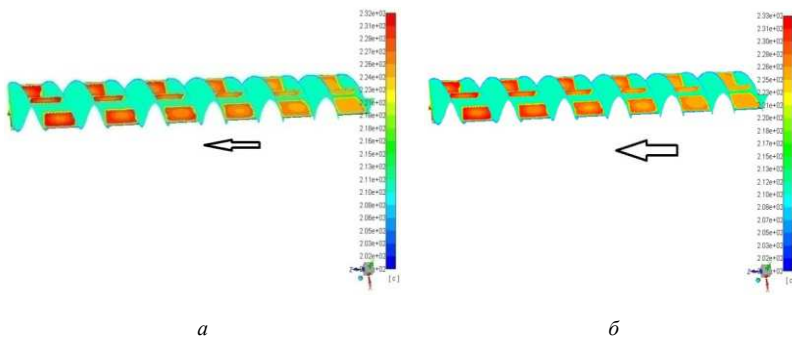


Рис. 4. Поле температур для полимера: *а* – до переработки; *б* – после переработки

Для оценки времени прохождения полимера через канал были рассчитаны значения времени пребывания (рис. 5).

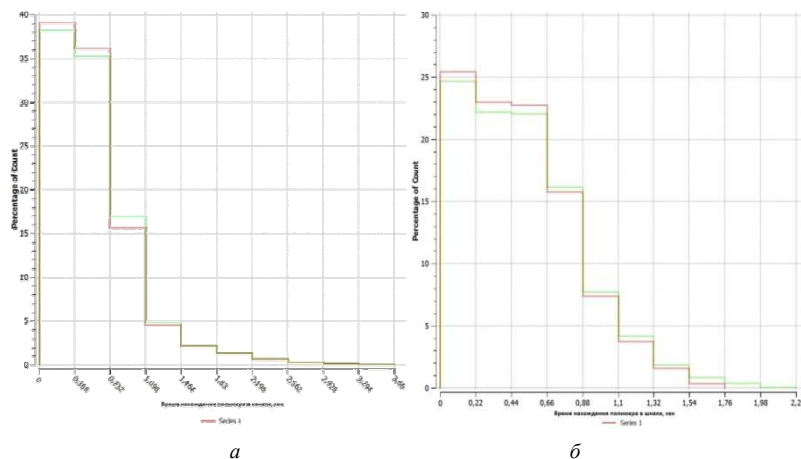


Рис. 5. Время нахождения полимера в шнеке: *а* – канал, *б* – шнек; зеленый – до переработки, красный – после переработки

Исследования показали, что повторная переработка изоляционно-го материала будет отличаться от ее первоначального экструдирования. Ввиду изменившихся физико-реологических свойств полимера меняются температурные поля в канале (для винтового канала максимальная разница по температурам составляет $1,2^\circ$, для плоского – $0,3^\circ$). Также меняется время пребывания полимера в рассматриваемой зоне дозирования экструдера (разница для винтового канала – 0,3 с, для плоского – 0,03 с). Таким образом, видно, что модель винтового канала позволяет более реально оценить время пребывания материала в канале. Полученные результаты (при дополнении их временем нахождения полимера в предыдущих зонах шнекового агрегата и формирующего инструмента) могут быть применены для оценки пригодности исследуемого технологического режима для беспроблемной переработки как исходного, так и повторно переработанного материала.

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 Пермского национального исследовательского политехнического университета. 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 политехнического университета. – 2012. – Т. 320, № 4. – С. 171–177.

5. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Наука, 1972. – 720 с.

Сведения об авторах

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

Шабловский Антон Станиславович – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КТЭ-18-1м, г. Пермь, e-mail: antshablov@gmail.com

А.В. Садчиков, Р.Р. Юсупов

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БИОГАЗОВЫХ СТАНЦИЙ

Сделан краткий анализ эффективности использования проекта биогазовых станций с энергетической, экономической и экологической точек зрения, затронуты основные причины существования проблем внедрения в эксплуатацию биогазовых установок.

Ключевые слова: биогазовые технологии, биогаз, биогазовые установки.

A.V. Sadchikov, R.R. Yusupov

COMPLEX EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF THE USE OF BIOGAS STATIONS

This article provides a brief analysis of the efficiency of using the project of biogas stations from the energy, economic and environmental points of view, and touches upon the main reasons for the existence of problems in introducing biogas plants into operation.

Keywords: biogas technology, biogas, biogas plants.

Биогаз – это газ, образующийся в результате процесса анаэробного сбраживания. Биогазовая установка может перерабатывать навоз, зеленые растения, отходы агропромышленного комплекса и бойни в горючий газ.

Биогаз можно использовать аналогично природному газу в газовых плитах или в качестве топлива для двигателей. Он состоит из 45–70 % метана, 30–40 % углекислого газа, 1–7 % водяного пара и следов H_2 , O_2 , H_2S , N_2 , NH_3 . Содержание энергии в газе зависит главным образом от присутствия в нем метана. Определенное содержание углекислого газа и водяного пара неизбежно, но содержание серы должно быть минимизировано, особенно для использования в двигателях.

Производство электроэнергии из биогаза может быть очень эффективным методом производства электроэнергии из возобновляемых источников энергии. Однако это применимо только в том случае, если выделяемое тепло от генератора энергии может использоваться экономически и экологически обоснованным образом. Средняя теплотворная способность биогаза составляет около 20–24 МДж/м³, поэтому 1 м³ биогаза соответствует 0,4–0,5 л дизельного топлива или около 5 кВт·ч.

Однако из-за потерь при конверсии 1 м³ биогаза можно перерабатывать только примерно до 1,6 кВт·ч.

Как правило, большие биогазовые установки более рентабельны по сравнению с малыми. Однако производство электроэнергии из биогаза является технологией, подходящей даже для относительно небольших применений в диапазоне 10–100 кВт.

Экономически электроэнергия из биогаза должна конкурировать с производством электроэнергии из ископаемого топлива и других возобновляемых источников энергии, таких как гидроэнергия. Поддерживающими факторами являются:

- низкая надежность электроснабжения от общих сетей с постоянным риском отключения электроэнергии и уязвимости гидроэлектростанций к засухе;

- рост цен на ископаемое топливо.

Подавляющие факторы:

- неблагоприятные условия для продажи электроэнергии;

- необходимость покупать качественные комплектующие из промышленно развитых стран;

- недостаток осведомленности, потенциала и опыта, препятствующих экономическому функционированию компонентов инфраструктуры;

- относительно низкие цены на ископаемое топливо.

Экономическая целесообразность биогазовой установки зависит от экономической ценности всего ассортимента продукции завода. Это: биогаз; электричество или механическая сила; суспензия используется в качестве удобрения; тепло, вырабатываемое двигателем внутреннего сгорания; эффект санитарии с сокращением ХПК и БПК (химическая и биологическая потребность в кислороде) в стоках агропромышленного комплекса.

Большинство коммерческих биогазовых электростанций в развивающихся странах имеют средние размеры и устанавливаются в промышленных условиях, в основном с использованием органических отходов, образующихся в агропромышленных производственных процессах, таких как навоз коров, свиней и кур, отходы скотобойни.

Оценки экономической целесообразности весьма противоречивы. Во многих пресс-релизах и информации от производителей биогазовых электростанций говорится о сроках окупаемости всего 1,5–2,5 г. В таких случаях электроэнергию биогазовых установок можно сравнить с ценой электроэнергии, поставляемой через общую сеть, или ценой сжиженного газа в бутылках. Однако эти цифры не-

реальны, за исключением прямого использования тепловой энергии, например для приготовления пищи, или в очень немногих местах с чрезвычайно дорогим дизельным топливом. Похоже, более реалистичные цифры рассчитаны экспертами «Агроинвестор» для средних и крупных станций (>50 кВт). Они ожидают периоды окупаемости для станций по одноставочному тарифу ($\sim 9,1$ руб/кВт·ч) в 7 лет при очень благоприятных условиях и 10 лет для неблагоприятных, но все еще экономически выгодных инвестиций.

Несмотря на эту теоретическую прибыльность, недавние примеры из Африки показывают, что производство электроэнергии из биогаза на самом деле не захватило рынок как «прибыльную» технологию. Ни один из заводов, описанных здесь, не мог быть установлен без международной технической и финансовой поддержки. Это связано с «пилотным» состоянием рынка и такими барьерами, как недостаточная осведомленность, опыт, местный потенциал, предварительное финансирование для разработки проектов.

Многие новые исследования приходят к выводу, что биогазовые электростанции не являются коммерчески жизнеспособными без субсидий или гарантированных высоких цен (~ 10 руб. / кВт·ч) на произведенную продукцию. В Германии и других промышленно развитых странах только гарантированные льготные тарифы привели к прорыву. Почти все известные биогазовые электростанции в развивающихся странах зависят от финансовой поддержки третьей международной стороны.

В России мало опыта в отношении возможности использования биогазовых электростанций для удовлетворения основных энергетических потребностей сельского населения. Большинство биогазовых электростанций подключены к агропромышленным объектам и обеспечивают электричеством лишь очень немногих непосредственных соседей. Тем не менее расчеты показывают, что биогаз может играть роль в снабжении изолированных сетей, где он представляет собой вариант с наименьшими затратами.

Однако, помимо ценовых соображений, остается много барьеров для проникновения на рынок и развития сектора биогаза:

- высокие первоначальные затраты на потенциальные оценки и технико-экономические обоснования;
- недостаток осведомленности о возможностях биогаза;
- отсутствие местного потенциала для разработки проекта, строительства, эксплуатации и обслуживания;

– отсутствие доступа к финансам;
– правовые рамочные условия, которые затрудняют производство и коммерциализацию альтернативной энергии: например, должно быть право на продажу электроэнергии на местном уровне.

Пока национальные рамочные условия не являются благоприятными, выработка электроэнергии из биогаза будет ограничена несколькими пилотными проектами.

Библиографический список

1. Возобновляемая энергия в России от возможности к реальности / ОЭСР/МЭА. – 2004. – 120 с.

2. Инновации проектирование и внедрение энергоэффективных технологий [Электронный ресурс] / ООО «Югэнерготрейд» // Развитие биогазовых технологий. – URL: <http://ugenergotreid.ru/>

3. Голубев В.М., Асташева Н.П. Технология использования различных источников энергии в сельском хозяйстве и методы их экологической оценки // Экология и сельскохозяйственная техника. – 2002. – Т. 3. – С. 48–52.

4. Старикова С. Председатель Правительства РФ Дмитрий Медведев: Альтернативная энергия – тема важная и перспективная // Белгородская правда. – 08.02.14. – № 017.

5. Биогаз как источник энергии / ВНИИСХ, РАСХН // Стройпрофиль. – 2002. – № 5.

6. Гелатуха Г.Г., Кобзарь С.Г. Современные технологии анаэробного сбраживания биомассы (обзор) // Экологии и ресурсосбережение. – 2002. – № 4.1. – С. 3–7.

7. Ковалев А.А., Ножевникова А.Н. Технологические линии утилизации отходов животноводства в биогаз и удобрение. – М.: Знание, 1990.

Сведения об авторах

Садчиков Алексей Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электро- и теплоэнергетика» Оренбургского государственного университета, г. Оренбург, e-mail: lyohantron@mail.ru

Юсупов Разиф Рафаэлевич – магистрант Оренбургского государственного университета, гр. 3-18ЭЭ(м)АЭСК, г. Оренбург, e-mail: Yusupov_Razif@mail.ru

Л.А. Влацкая, Д.С. Казаков

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА НЕОПРЕДЕЛЕННЫХ
МНОЖИТЕЛЕЙ ЛАГРАНЖА В КАЧЕСТВЕ РЕШЕНИЯ
ЗАДАЧИ ПО ОПТИМИЗАЦИИ РАЗМЕЩЕНИЯ
КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ**

Метод неопределенных множителей Лагранжа применен в качестве решения задачи по оптимизации размещения компенсирующих устройств.

Ключевые слова: метод Лагранжа, компенсация, оптимизация.

L.A. Vlatskaya, D.S. Kazakov

**APPLICATION OF THE METHOD OF INDEFINITE LAGRANGE
MULTIPLIERS AS A SOLUTION TO THE PROBLEM OF OPTIMIZING
THE PLACEMENT OF COMPENSATING DEVICES**

In this article, the method of uncertain Lagrange multipliers is used as a solution to the problem of optimizing the placement of compensating devices.

Keywords: Lagrange method, compensation, optimization.

В элементах электрической сети, которые обладают активным сопротивлением, протекает реактивная мощность, способствующая увеличению потерь мощности и электроэнергии. Помимо этого, возникает уменьшение пропускной способности линий ввиду наличия перетоков реактивной мощности. Это влияет на необходимость принятия ряда технических решений по борьбе с этим явлением: увеличение сечения, замена трансформаторов с большей номинальной мощностью и проч.

Задачи по компенсации реактивной мощности являются весьма значимыми в общем спектре вопросов, связанных с повышением качества передачи электроэнергии, а также ее распределения и потребления. В большинстве случаев именно правильный подход к решению таких задач будет определять рациональное расходование материальных и денежных ресурсов. Ввиду этого так необходим современный подход к решению такого рода задач, с рассмотрением современных позиций и технических решений в данной области.

Рассмотрение вопроса компенсации реактивной мощности будет включать в себя ряд задач: реализация мер по уменьшению реактивной мощности электроприемников потребителей; определение типа и места установки компенсирующего устройства; осуществление оптимизации режимов работы компенсирующих устройств по ряду специализированных критериев электроэнергетических систем.

Для решения задачи оптимизации выбора мест размещения компенсирующих устройств был выбран метод неопределенных множителей Лагранжа, который позволяет свести задачу условной оптимизации (поиска относительного экстремума) к более простой задаче безусловной оптимизации (поиска абсолютного экстремума).

Реализация рассматриваемого метода приведена ниже на примере поставленной задачи. Математическая модель будет иметь вид

$$\Delta P(Q_{KY1...n}) = \sum_{i=1}^n \frac{(Q_i - Q_{KYi})^2}{U^2} R_i \rightarrow \min \quad (1)$$

с учетом ограничения

$$\sum_{i=1}^n Q_{KYi} \leq Q_K \quad (2)$$

и граничных условий

$$Q_{KYi} \geq 0, \quad i = \overline{1, n}. \quad (3)$$

Для решения задачи оптимизации (1) с ограничением (2) и граничными условиями (3) составляется функция Лагранжа:

$$L(Q_{KY1...n}, \lambda) = \Delta P(Q_{KY1...n}) + \lambda \left(\sum_{i=1}^n Q_{KYi} - Q_K \right) \rightarrow \min,$$

минимум которой определяется из решения системы уравнений

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial Q_{KYi}} L(Q_{KY1...n}, \lambda) = 0, \\ \frac{\partial}{\partial \lambda} L(Q_{KY1...n}, \lambda) = 0, \end{cases} \quad Q_{KYi} \geq 0, \quad i = \overline{1, n}, \quad (4)$$

где λ – неопределенный множитель Лагранжа.

Результатом решения системы (4) являются искомые мощности ККУ ($Q_{KYi} > 0$) и места их установки (узлы сети, для которых $Q_{KYi} \neq 0$).

Решение задачи выбора оптимальной мощности КУ и мест их установки в семиузловой схеме (рис. 1) методом неопределенных множителей Лагранжа средствами MathCad представлено на рис. 2, 3.

В таблице приведены исходные данные для решения задачи.

Исходные данные

R_1 , Ом	R_2 , Ом	R_3 , Ом	R_4 , Ом	R_5 , Ом	R_6 , Ом	R_7 , Ом
0,779	0,407	0,728	0,303	0,357	0,09	0,197
Q_1 , квар	Q_2 , квар	Q_3 , квар	Q_4 , квар	Q_5 , квар	Q_6 , квар	Q_7 , квар
356,15	383,65	418,03	148,75	292,02	284,49	126,1
$Q_K = 1650$ квар						

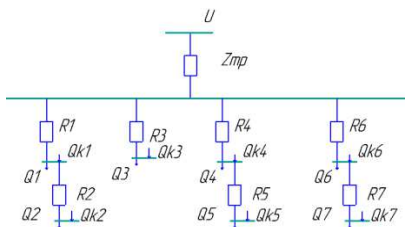


Рис. 1. Схема системы электроснабжения

Целевая функция

$$\Delta P(Qk1, Qk2, Qk3, Qk4, Qk5, Qk6, Qk7) := \left[\begin{aligned} & \frac{(Q1 + Q2 - Qk1 - Qk2)^2 \cdot R1}{U^2} + \frac{(Q2 - Qk2)^2 \cdot R2}{U^2} \dots \\ & + \frac{(Q3 - Qk3)^2 \cdot R3}{U^2} + \frac{(Q4 + Q5 - Qk4 - Qk5)^2 \cdot R4}{U^2} \dots \\ & + \frac{(Q5 - Qk5)^2 \cdot R5}{U^2} + \frac{(Q6 + Q7 - Qk6 - Qk7)^2 \cdot R6}{U^2} \dots \\ & + \frac{(Q7 - Qk7)^2 \cdot R7}{U^2} \end{aligned} \right]$$

Функция Лагранжа

$$L(Qk1, Qk2, Qk3, Qk4, Qk5, Qk6, Qk7, \lambda) := \Delta P(Qk1, Qk2, Qk3, Qk4, Qk5, Qk6, Qk7) \dots + \lambda \cdot (Qk1 + Qk2 + Qk3 + Qk4 + Qk5 + Qk6 + Qk7 - QK)$$

Рис. 2. Математическая модель рассматриваемой задачи

$$Qk := \text{Find}(Qk1, Qk2, Qk3, Qk4, Qk5, Qk6, Qk7, \lambda) \rightarrow \begin{pmatrix} 329.13626149959117085 \\ 383.65 \\ 389.1238155332163765 \\ 79.298837320731096025 \\ 292.02 \\ 50.671085646461356616 \\ 126.1 \\ 0.42087404583636955809 \end{pmatrix}$$

$$\Delta P(Qk_1, Qk_2, Qk_3, Qk_4, Qk_5, Qk_6, Qk_7) = 75.587$$

Рис. 3. Результаты решения задачи оптимального распределения компенсирующих устройств

Таким образом, при установке КУ ($Q_{k_1} = 329,1$ квар; $Q_{k_2} = 383,7$ квар; $Q_{k_3} = 389,1$ квар; $Q_{k_4} = 79,3$ квар; $Q_{k_5} = 292$ квар; $Q_{k_6} = 50,7$ квар; $Q_{k_7} = 126,1$ квар) потери активной мощности составят 75,6 кВт.

Библиографический список

1. Александров О.И., Падалко Л.П., Никольская Н.Н. Уменьшение потерь в сложнотамкнутой электрической сети путем компенсации реактивных мощностей нагрузок // Опыт планирования, анализа потерь энергии и разработка мероприятий по их снижению в энергосистеме. – Минск: Высшая школа, 1974. – С. 65–71.

2. Ефременко В.М., Беляевский Р.В. Расчет оптимального размещения компенсирующих устройств методом множителей Лагранжа // Вестник Кузбас. техн. ун-та. – 2012.

3. Ковалев И.Н. О направлениях исследований в области компенсации реактивной мощности (дискуссия) // Электричество. – 1981. – № 10. – С. 61–64.

4. Майоров А.В., Осинцев К.А., Шунтов А.В. О применении номинального напряжения 20 кВ в воздушных электрических сетях // Электричество. – 2018. – № 9. – С. 4–11.

Сведения об авторах

Влацкая Людмила Анатольевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электро- и теплоэнергетика» Оренбургского государственного университета, г. Оренбург, e-mail: l_sem@mail.ru

Казаков Дмитрий Сергеевич – магистрант Оренбургского государственного университета, гр. 17ЭЭ(м)-АЭСК, г. Оренбург, e-mail: diman-kazakov@mail.ru

Н.Г. Семенова, А.С. Чугунов

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА РОСТА
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ПРОМЫШЛЕННОГО
ПРЕДПРИЯТИЯ С ПОМОЩЬЮ РЕШЕНИЯ
ОПТИМИЗАЦИОННЫХ ЗАДАЧ**

Рассматривается решение математических оптимизационных задач с недетерминированными исходными данными для прогнозирования роста электрических нагрузок промышленного предприятия.

Ключевые слова: система электроснабжения, промышленное предприятие, электрические нагрузки, оптимизационные задачи.

N.G. Semenova, A.S. Chugunov

**FORECASTING THE GROWTH COEFFICIENT OF ELECTRICAL
LOADS OF INDUSTRIAL ENTERPRISES BY MEANS
OF SOLVING OPTIMIZATION PROBLEMS**

This article discusses the solution of mathematical optimization problems with nondeterministic input data for determining the growth of electrical loads of an industrial enterprise.

Keywords: power supply system, industrial enterprise, electrical loads, optimization problems.

Прогнозирование электрических нагрузок является значимым аспектом исследования в электроэнергетике. Оно имеет большое значение для решения практически всего спектра задач текущего планирования и оперативного управления режимами функционирования электроэнергетической системы, а также совокупностью промышленных предприятий. Применительно к последним, сведения как о существующих значениях электрических нагрузок, так и о значениях нагрузок в последующих временных интервалах важны, например, для принятия решения о проведении обновления, модернизации или реконструкции действующей системы электроснабжения (СЭС) предприятия.

Известно, что существующие СЭС условно классифицируются по величине коэффициента роста нагрузок $k_{рн}$ [1]. В соответствии с предложенным разделением выделяют следующие группы СЭС:

1. Стабильно-функционирующие. Обычно данные группы СЭС свойственны промышленным предприятиям, находящимся в городских районах с плотной застройкой. Для них энергопотребление остается примерно на постоянном уровне и поэтому $k_{\text{рн}} \approx 1$.

2. Развивающиеся. Характерно строительство новых объектов, реконструкция функционирующих, что способствует постепенному повышению уровня электропотребления, соответственно, $k_{\text{рн}} > 1$.

3. Для группы угасающих СЭС значение коэффициента $k_{\text{рн}} < 1$, так как из-за снижения объемов производства, сноса аварийных зданий и так далее уменьшается потребление электроэнергии.

Перспективный рост или снижение электрических мощностей в СЭС является неопределенной (недетерминированной) информацией. Для решения оптимизационных задач с неполной исходной информацией существующие методы математического программирования непригодны, поэтому задачи оптимизации, связанные с прогнозированием нагрузок промышленных предприятий, нужно решать с использованием вычислительного аппарата теории игр [2, 3].

Таким образом, первый игрок – человек, принимающий решение, по какому сценарию будет развиваться промышленное предприятие. Второй игрок – энергосистема, а именно перспективные значения электрических нагрузок потребителей предприятия. Какие значения мощностей потребителей будут в будущем, неизвестно.

В ходе решения оптимизационной задачи составляется матрица затрат, строки которой соответствуют решениям первого игрока, а столбцы – решениям второго. В данной статье будут рассмотрены четыре стратегии выбора оптимального решения.

Постановка задачи: необходимо определить коэффициент роста нагрузок $k_{\text{рн}}$ промышленного предприятия. Перспективы изменения энергопотребления неизвестны.

Исходные данные (табл. 1): известно, что суммарная мощность потребителей завода в настоящее время имеет значение $P_1 = 14,907$ МВт ($k_{\text{рн}} \approx 1$). Потребление энергии заводом может как повыситься и иметь значение P_2 ($k_{\text{рн}} > 1$), так и понизиться, потребляемая мощность при этом будет равна P_3 ($k_{\text{рн}} < 1$). Условно примем, что возможное повышение и понижение составит не более $\pm 30\%$ относительно P_1 .

Предприятие имеет собственную главную понизительную подстанцию. За счет имеющейся ГПП можно обеспечить только незначительный прирост мощности завода без реконструкции (не более

5–7 %), т.е. мощность ГПП можно принять за $X \approx 1\,4907$ МВт. Укрупненные показатели стоимости реконструкции берутся из табл. 15 прил. № 1 сборника¹. Таким образом, усредненные затраты без учета НДС на ввод новой единицы мощности (реконструкцию) ГПП составляют $z_n = 2348,82$ тыс. руб/МВт. В перспективе промпредприятие может оказаться на самобалансе или при дефиците мощности. Во втором случае недостающую мощность можно получить путем осуществления технологического присоединения к сетям местной сетевой компании. При этом за каждую единицу мощности, взятую из соседней энергосистемы, необходимо платить $z_n = 5165,41$ тыс. руб/МВт. Расчет стоимости технологического присоединения может выполняться с помощью онлайн-калькулятора [4].

Решение: выбор оптимального объема ввода генерирующих мощностей (определение возможных значений $k_{рн}$ при нынешних условиях, т.е. затратах на ввод мощностей) осуществляется с использованием критериев анализа ситуаций: Лапласа, Вальда, Сэвиджа и Гурвица.

Таблица 1

Исходные данные

P_1 , МВт	P_2 , МВт	P_3 , МВт	X , МВт	z_n , тыс. руб/МВт	z_n , тыс. руб/МВт
14,907	19,379	10,435	14,907	2348,82	5165,41

Определение затрат для заполнения платежной матрицы (табл. 2) выполняется по формуле

$$Z_{i,j} = (P_i - X) \cdot z_n + |P_i - P_j| \cdot z_n,$$

где z_n – затраты на ввод новой единицы мощности, тыс. руб/МВт;
 z_n – затраты на ввод новой единицы мощности за счет покупки мощности у энергосистемы, тыс. руб/МВт.

Таблица 2

Матрица затрат и расчет по критерию Лапласа

Вариант развития	Затраты			Ожидаемые затраты
	Вариант спроса			
	1	2	3	
1) $k_{рн} \approx 1$	0,000	23 099,971	23 099,971	15 399,981
2) $k_{рн} > 1$	33 604,022	10 504,051	56 703,993	33 604,022
3) $k_{рн} < 1$	12 595,920	35 695,890	−10 504,051	12 595,920
Значение коэффициента роста нагрузок				$k_{рн} < 1$

¹ Сборник укрупненных показателей стоимости строительства (реконструкции) подстанций и линий электропередачи для нужд ОАО «Холдинг МРСК». М., 2012. 71 с.

1. Критерий минимума средних затрат – критерий недостаточного основания (критерий Лапласа). Затраты вычисляются по формуле

$$Z = \min_{Z_i} \left\{ \frac{1}{n} \sum_n f_{ni} \right\}.$$

Вероятность наступления каждого случая равна 1/3.

Ожидаемые затраты для каждого варианта развития:

- 1) $1/3(0 + 23099,971 + 23099,971) = 15399,981$ тыс. руб.;
- 2) $1/3(33604,022 + 10504,051 + 56703,993) = 33604,022$ тыс. руб.;
- 3) $1/3(12595,92 + 35695,89 - 10504,051) = 12595,92$ тыс. руб.

По данному критерию коэффициент роста нагрузок предприятия будет уменьшаться.

2. Минимаксный критерий (критерий Вальда) (табл. 3). Затраты вычисляются по формуле

$$Z = \min_{Z_i} \cdot \max_{\Theta_n} \{f_{ni}\}. \quad (1)$$

Таблица 3

Расчет по критерию Вальда

Затраты				Наихудший вариант	Наилучший из наихудших
Вариант развития	Вариант спроса				
	1	2	3		
1) $k_{рн} \approx 1$	0,000	23 099,971	23 099,971	23 099,971	23 099,971
2) $k_{рн} > 1$	33 604,022	10 504,051	56 703,993	56 703,993	
3) $k_{рн} < 1$	12 595,920	35 695,890	-10 504,051	35 695,890	
Значение коэффициента роста нагрузок					$k_{рн} \approx 1$

По значению данного критерия можно сказать, что энергопотребление будет оставаться на постоянном уровне.

3. Критерий минимаксного риска (критерий Сэвиджа)

$$Z = \min_{Z_i} \cdot R_i^{\max} = \min_{Z_i} \cdot \max_{\Theta_n} \{R_{ni}\},$$

где R_i – матрица рисков (от принятия неверного решения), определяемая по формуле

$$R_{ni} = \begin{cases} f_{ni} - \min_k \{f_{nk}\}, & \text{если } f \rightarrow \min, \\ \max_k \{f_{nk}\} - f_{ni}, & \text{если } f \rightarrow \max. \end{cases}$$

По значению данного критерия можно сказать, что энергопотребление также будет оставаться примерно одинаковым.

4. Критерий Гурвица, затраты вычисляются по формуле

$$Z = \min_{Z_i} \left[\alpha \cdot \max_{\Theta_n} f_{ni} + (1 - \alpha) \cdot \min_{\Theta_n} f_{ni} \right],$$

где α – коэффициент пессимизма-оптимизма Гурвица, показывающий, с каким весовым показателем принимается в расчет наиболее неблагоприятная ситуация (табл. 4–8).

Таблица 4

Матрица рисков

Риски				Максимальный	Минимальный из максимальных
Вариант развития	Вариант спроса				
	1	2	3		
1) $k_{рп} \approx 1$	0,000	23 099,971	23 099,971	23 099,971	23 099,971
2) $k_{рп} > 1$	23 099,971	0,000	46 199,942	46 199,942	
3) $k_{рп} < 1$	23 099,971	46 199,942	0,000	46 199,942	
Значение коэффициента роста нагрузок					$k_{рп} \approx 1$

Таблица 5

Минимальные и максимальные затраты

Вариант развития	Минимальные затраты	Максимальные затраты
1) $k_{pn} \approx 1$	0,000	23 099,971
2) $k_{pn} > 1$	10 504,051	56 703,993
3) $k_{pn} < 1$	–10 504,051	35 695,890

Таблица 6

Затраты при разных коэффициентах доверия

$\alpha \min Z_{ji} + (1 - \alpha) \max Z_{ji}$ при коэффициенте доверия					
0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
23 099,971	18 479,977	13 859,982	9239,988	4619,994	0,000
56 703,993	47 464,004	38 224,016	28 984,028	19 744,040	10 504,051
35 695,890	26 455,902	17 215,914	7975,925	–1264,063	–10 504,051

Таблица 7

Минимальные значения затрат

Минимальное значение критерия при коэффициенте доверия					
0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
23 099,971	18 479,977	13 859,982	7975,925	–1264,063	–10 504,051

Оптимальные варианты развития

Оптимальный вариант при коэффициенте доверия					
0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
$k_{\text{ри}} \approx 1$	$k_{\text{ри}} \approx 1$	$k_{\text{ри}} \approx 1$	$k_{\text{ри}} < 1$	$k_{\text{ри}} < 1$	$k_{\text{ри}} < 1$

Расчет по критерию Гурвица не дает однозначного ответа на вопрос о том, к какому типу будет относиться предприятие – к типу стабильно-функционирующих или к типу угасающих.

В ходе решения оптимизационных задач было определено, что коэффициент роста нагрузок предприятия будет оставаться примерно равным единице (≈ 1) либо быть немного меньше (< 1). Из этого следует, что роста энергопотребления не будет, т.е. предприятие можно отнести к группе стабильно-функционирующих.

Библиографический список

1. Семенова Л.А. Разработка методики принятия решения по развитию системы электроснабжения с применением техникоэкономического подхода и теории нечетких множеств: дис. ... канд. техн. наук / УГТУ-УПИ. – Екатеринбург, 2010.

2. Влацкая Л.А., Семенова Н.Г. Исследование и моделирование электроэнергетических систем: метод. указания / Оренбург. гос. ун-т. – Оренбург, 2018. – 40 с.

3. Костин В.Н. Оптимизационные задачи в электроэнергетике: учеб. пособие / СЗТУ. – СПб., 2003. – 120 с.

4. Портал электросетевых услуг. – URL: <https://портал-тп.рф>

Сведения об авторах

Семенова Наталья Геннадьевна – доктор педагогических наук, кандидат технических наук, профессор кафедры «Автоматизированный электропривод, электромеханика и электротехника» Оренбургского государственного университета, г. Оренбург, e-mail: tomsk@house.osu.ru

Чугунов Андрей Сергеевич – магистрант Оренбургского государственного университета, гр. 18ЭЭ(м)АЭСК, г. Оренбург, e-mail: chugunovandrey30@gmail.com

А.В. Суховеев, С.В. Митрофанов

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ СОЛНЕЧНОЙ ПАНЕЛИ

Рассматривается математическая модель процесса автоматизации управления солнечной панелью с помощью микроконтроллера.

Ключевые слова: автоматизация, солнечная энергетика.

A.V. Suhoveev, S.V. Mitrofanov

AUTOMATED CONTROL SYSTEM OF MOTION OF THE SOLAR PANEL

This article discusses the mathematical model of the automation of solar panel control using a microcontroller.

Keywords: automation, solar energy.

Для определения положения Солнца на небе необходимо знать горизонтальные координаты – азимут и высоту. Центр системы отсчета совпадает с центром оси солнечной панели. Расчеты ведутся относительно плоскости математического горизонта.

Азимут A – это угол между полуденной линией (линией, направленной на юг) и линией пересечения плоскости математического горизонта с плоскостью вертикального круга светила. Отсчитывается от точки юга в сторону суточного вращения небесной сферы в пределах от 0° до 360° , или от 0° до $+180^\circ$ к западу и от 0° до -180° к востоку. Горизонтальные координаты светила постоянно изменяются вследствие суточного вращения Земли.

Высота h – это угол между плоскостью математического горизонта и направлением на светило, отсчитывается от 0° до $+90^\circ$ к зениту и от 0° до -90° к надиру.

Высота

$$h = \arcsin(\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos t),$$

где δ – склонение светила; t – часовой угол светила; ϕ – широта точки наблюдения (0° – экватор, от 0° до $+90^\circ$ для северного полушария, от 0° до -90° для южного полушария).

Азимут

$$A = \text{atan } 2(\cos \delta \cdot \sin t, \cos \delta \cdot \sin \varphi \cdot \cos t - \sin \delta \cdot \cos \varphi).$$

Расшифровка функции $\text{atan2}(y, x)$

$$\text{atan } 2(y, x) = \begin{cases} \arctan\left(\frac{y}{x}\right), & x > 0, \\ \arctan\left(\frac{y}{x}\right) + \pi, & y \geq 0, x < 0, \\ \arctan\left(\frac{y}{x}\right) - \pi, & y < 0, x < 0, \\ +\frac{\pi}{2}, & y > 0, x = 0, \\ -\frac{\pi}{2}, & y < 0, x = 0, \\ \text{undefined}, & y = 0, x = 0. \end{cases}$$

Склонение δ – угол между плоскостью небесного экватора и направлением на Солнце (от 0° до $+90^\circ$ для северного полушария, от 0° до -90° для южного полушария). Склонение Солнца изменяется в течение года (неравномерно) от $-23,43^\circ$ до $+23,43^\circ$ вследствие орбитального движения Земли вокруг Солнца и не связано с суточным вращением Земли.

Часовой угол t – двухгранный угол между плоскостью небесного меридиана и кругом склонения светила. Отсчитывается в сторону суточного вращения небесной сферы, к западу от верхней точки небесного экватора, в пределах от 0° до 360° или от 00:00 до 24:00 во временной мере. Также часовой угол может измеряться в пределах от 0° до 180° , или от 00:00 до 12:00 к западу и от 0° до -180° , или от 00:00 до $-12:00$ к востоку. Часовой угол равен нулю в момент верхней кульминации светила, для Солнца – в истинный полдень, который не всегда совпадает с моментом времени, когда часы показывают 12:00 по местному времени. Часовой угол светила изменяется в течение суток вследствие суточного вращения Земли, поэтому его можно вычислить, зная истинное солнечное время.

Часовой угол

$$t = T_{\text{с.ист}} - 12,$$

где $T_{\text{с.ист}}$ – истинное солнечное время (от 00:00 до 23:59 ч).

Истинное солнечное время можно вычислить, зная местное время, часовой пояс и долготу точки наблюдения.

Истинное солнечное время

$$T_{\text{с.ист}} = T_{\text{с.ср}} + \text{EOT_or_} T_{\text{с.ист}} = \text{UTC} + \lambda + \text{EOT},$$

где $T_{\text{с.ср}}$ – среднее солнечное время в определенной точке на Земле; UTC – всемирное координированное время; λ – долгота точки наблюдения в часовых единицах; EOT – уравнение времени.

Всемирное координированное время можно вычислить из местного времени $T_{\text{м}}$ и часового пояса UTC. Долгота местоположения λ отсчитывается от 0° до 180° к востоку от нулевого меридиана (восточная долгота) и от 0° до -180° к западу (западная долгота). При подстановке в вышеприведенную формулу долготу нужно перевести в часовые единицы ($1^\circ = 4$ мин).

Уравнение времени EOT показывает разницу между средним солнечным временем и истинным солнечным временем, так как суточное движение Солнца неравномерно вследствие эллиптичности орбиты Земли, а также наклона земной оси к плоскости эклиптики.

Уравнение времени EOT

$$\text{EOT} = 9,87 \sin 2B - 7,53 \cos B - 1,5 \sin B,$$

$$B = (360^\circ(N - 81)) / 365,$$

где N – порядковый номер дня в году.

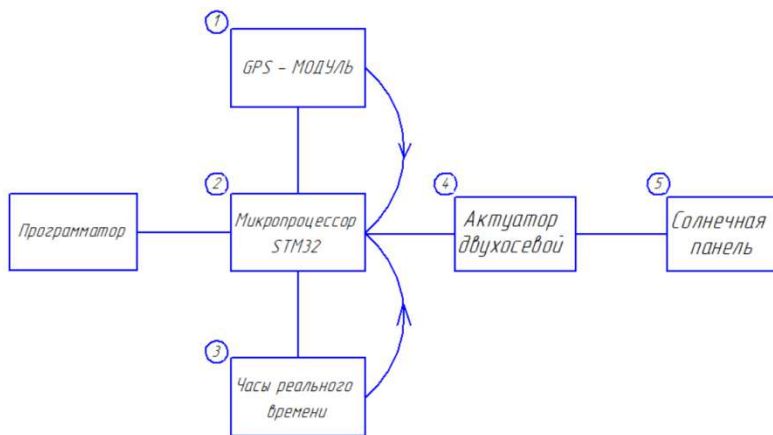


Рис. Структурная схема управления солнечной панелью

Таким образом, в течение года значение уравнения времени изменяется от $-14,3$ до $+16,4$ мин.

Структурная схема управления солнечной панелью показана на рисунке. Программатор служит для записи необходимого программного кода в память микропроцессора. Микропроцессор 2 необходим для обработки сигналов и управления солнечной панелью через систему приводов актуатора. GPS-модуль 1 необходим для точного позиционирования солнечной панели относительно Солнца. Часы реального времени 3 определяют точное время и передают данные для формульных расчетов в микропроцессор. Актуатор двухосевой 4 двигает солнечную панель относительно команд микропроцессора. Солнечная панель 5 служит для построения экспериментальной модели.

Библиографический список

1. Пандул И.С. Астрономические определения по Солнцу. – М.: Недра, 2010. – 79 с.
2. Сурдин В.А. Солнечная система. – М.: Физматлит, 2012. – 26 с.
3. Пионкевич В.А. Аспекты практического применения солнечных установок для электроснабжения промышленных и сельскохозяйственных потребителей / ИГТУ. – Иркутск, 2013. – 27 с.
4. Проблемы мониторинга солнечных энергетических систем в России / Т.С. Габдрахманова, С.И. Зайцев, С.В. Киселева, А.Б. Тарасенко, В.П. Шакун; Объединенный институт высоких температур РАН. – М., 2012. – 201 с.
5. Возмилов А.Г., Малюгин С.А., Малюгина А.А. Алгоритмы слежения за точкой максимальной мощности фотоэлектрических преобразователей / МГУ. – М., 2015. – 112 с.

Сведения об авторах

Митрофанов Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электро- и теплоэнергетика» Оренбургского государственного университета, г. Оренбург, e-mail: mitser2002@mail.ru

Суховеев Андрей Владимирович – магистрант Оренбургского государственного университета, гр. 18-ЭЭ(м)-АЭСК, г. Оренбург, e-mail: energo.dorstroy@gmail.com

И.А. Иванова, К.Р. Валиуллин, С.В. Митрофанов

ВЫБОР АППРОКСИМИРУЮЩЕЙ ФУНКЦИИ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ И РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ТОКА

Произведен расчет и выбор аппроксимирующей функции кривой намагничивания и разработана математическая модель трансформатора тока.

Ключевые слова: кривая намагничивания, насыщение трансформаторов тока.

I.A. Ivanova, K.R. Valiullin, S.V. Mitrofanov

THE CHOICE OF THE APPROXIMATING FUNCTION MAGNETIZATION CURVE AND THE DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF SINGLE-PHASE CURRENT TRANSFORMER

In this article, the calculation and selection of the approximating function of the magnetization curve and developed a mathematical model of the current transformer

Keywords: magnetization curve, saturation of current transformers.

Дифференциальная защита (ДЗ) является основной защитой силового трансформатора. Ложное или неправильное ее срабатывание может привести к значительному экономическому и технологическому ущербу. Исходя из этого важно, чтобы защита работала правильно. В переходных режимах возможно насыщение сердечников трансформаторов тока (ТТ), которое может приводить к появлению больших погрешностей, а также к излишним срабатываниям ДЗ. Для проверки устройств релейной защиты необходима наиболее приближенная к реальной форма кривой вторичного тока. Для ее получения можно использовать математическую модель.

Работа трансформатора основана на законе электромагнитной индукции [1]. Процесс намагничивания сердечника ТТ можно изобразить в виде кривой намагничивания, которая представляет собой зависимость магнитной индукции от напряженности магнитного поля $B = f(H)$. Кривые намагничивания в справочниках и литературе обычно приводятся в графическом либо табличном виде. Известны

следующие варианты представления кривой намагничивания: степенные функции, дробно-линейные, тригонометрические, экспоненциальные, полиномиальные, логарифмические, гиперболические, тензорные, кусочно-линейные и др. [2]. Для описания работы ТТ с насыщением необходима такая математическая модель, которая будет выводить наиболее приближенную к реальной форму вторичного тока.

Исходя из принципа действия работы трансформатора можно использовать следующую систему уравнений для описания работы ТТ с насыщением:

$$\begin{cases} w_2 s \frac{dB}{dt} = (R_{об} + R_n) i_2 + (L_{об} + L_n) \frac{di_2}{dt}; \\ Hl = w_1 i_1 - w_2 i_2; \\ B = f(H), \end{cases}$$

где w_1 , w_2 – число витков первичной и вторичной обмоток соответственно; s – сечение стали магнитопровода; $R_{об}$, $L_{об}$ – активное сопротивление и индуктивность вторичной обмотки; R_n , L_n – то же нагрузки; i_1 , i_2 – первичный и вторичный токи ТТ; l – средняя длина силовой линии магнитного поля; B – характеристика намагничивания электротехнической стали, $B = f(H)$.

Для моделирования насыщения сердечника ТТ зависимость $H = f(B)$ представляется в виде аппроксимирующей функции. Как было указано ранее, их существует большое количество. Каждая из них описывает кривую насыщения с определенной точностью.

К рассмотрению принимаются две функции, наиболее простые и обеспечивающие высокую точность: аппроксимация кривой намагничивания гиперболическим синусом и аппроксимация кривой намагничивания полиномом.

$$\begin{aligned} H &= p_1 \sinh(p_2 B); \\ H &= p_1 B + p_2 B^3 + p_3 B^5 + p_4 B^7 + p_5 B^9. \end{aligned} \quad (1)$$

Эти функции хорошо подходят для аппроксимации кривой намагничивания стали (рис. 1). В данной работе использована электротехническая холоднокатаная сталь марки 3413 [3].

Первый случай – аналитическое представление кривой намагничивания гиперболическим синусом. Для этого задаются две точки B и H для определения параметров функции:

Первая точка $B_1 = 1,4$ Тл, $H_1 = 320$ А/м, вторая: $B_2 = 1,9$ Тл, $H_2 = 3825$ А/м. Расчет выполняется в среде Mathcad.

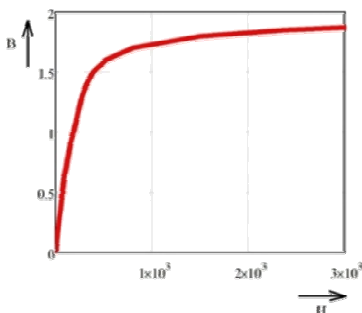


Рис. 1. Кривая намагничивания стали по данным производителя

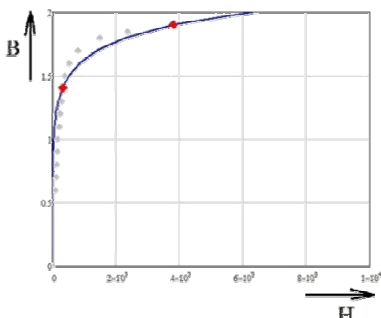


Рис. 2. Графики аналитической (сплошная линия) и экспериментальной кривых намагничивания (прерывистая линия)

Расчет коэффициентов уравнения, моделирующего кривую намагничивания (рис. 2):

$$p_1 = \frac{H_2}{\sinh(p_2 \cdot B_2)} = 0,616;$$

$$p_2 = \frac{\ln(\frac{H_2}{H_1})}{B_2 - B_1} = 4,962.$$

Функция кривой намагничивания принимает вид

$$H = 0,616 \sinh(4,962B).$$

Второй случай – аппроксимация кривой намагничивания полиномом (1). Для этого будет использоваться метод наименьших квадратов (МНК) – это математический метод, применяемый для решения различных задач, основанный на минимизации суммы квадратов отклонений некоторых функций от искомых переменных. Он может использоваться для «решения» переопределенных систем уравнений (когда количество уравнений превышает количество неизвестных), для поиска решения в случае обычных (не переопределенных) нелинейных систем уравнений, для аппроксимации точечных значений некоторой функции [4]. В соответствии с данным методом составлены следующие уравнения:

$$f_1(p_1, p_2, p_3, p_4, p_5) = \sum_{i=0}^N [2[p_1 B_i + p_2 (B_i)^3 + p_3 (B_i)^5 + p_4 (B_i)^7 + p_5 (B_i)^9 - H_i] B_i];$$

$$f_2(p_1, p_2, p_3, p_4, p_5) = \sum_{i=0}^N [2[p_1 B_i + p_2 (B_i)^3 + p_3 (B_i)^5 + p_4 (B_i)^7 + p_5 (B_i)^9 - H_i] (B_i)^3];$$

$$f_3(p_1, p_2, p_3, p_4, p_5) = \sum_{i=0}^N [2[p_1 B_i + p_2 (B_i)^3 + p_3 (B_i)^5 + p_4 (B_i)^7 + p_5 (B_i)^9 - H_i](B_i)^5] \text{ и т. д.}$$

Задаются начальные условия и определяются коэффициенты:

$$p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = p_5 = 1000.$$

Рассчитанные значения коэффициентов:

$$p_1 = 153,439, p_2 = -90,48, p_3 = 237,258, p_4 = -150,194, p_5 = 31,89.$$

Функция принимает вид (рис. 3):

$$H = 153,439B - 90,482B^3 + 237,258B^5 - 150,194B^7 + 31,89B^9.$$

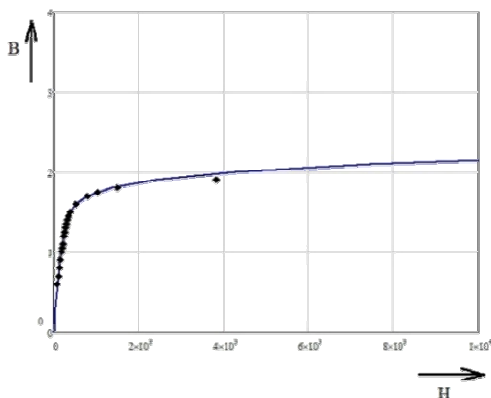


Рис. 3. Графики аналитической (сплошная линия – аппроксимация полиномом) и кривой намагничивания по данным таблицы (прерывистая линия)

Для оценки точности построенных графиков составлена сравнительная таблица. Сравнив данные аппроксимации, сделали вывод, что второй метод оказался наиболее точным. Он и будет использоваться для построения математической модели насыщения ТТ.

Сравнение погрешностей аппроксимации гиперболическим синусом и полиномом

Метод	Погрешность, %	
	Линейный участок	Участок насыщения
Гиперб. синусом	44	9
полиномом	16	3,5

Реализация работы модели осуществляется на языке MatLab. Для модели используются данные ТТ ТОЛ-СВЭЛ-10 1000/5.

Исходная система имеет вид:

$$\begin{cases} w_2 s \frac{dB}{dt} = (R_{o6} + R_n) i_2 + (L_{o6} + L_n) \frac{di_2}{dt}; \\ Hl = w_1 i_1 - w_2 i_2; \\ H = p_1 B + p_2 B^3 + p_3 B^5 + p_4 B^7 + p_5 B^9. \end{cases}$$

Система в матричной форме:

$$\begin{pmatrix} w_2 s - (L_{o6} + L_n) \\ l(p_1 + 3p_2 B^2 + 5p_3 B^4 + 7p_4 B^6 + 9p_5 B^8) w_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{dB}{dt} \\ \frac{di_2}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (R_{o6} + R_n) i_2 \\ w_1 \frac{di_2}{dt} \end{pmatrix}.$$

Для решения систем дифференциальных уравнений в MatLab используется решатель ode45.

Система уравнений преобразовывается к форме Коши:

$$\begin{pmatrix} \frac{dB}{dt} \\ \frac{di_2}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{w_2 (R_{o6} + R_n) i_2 + (L_{o6} + L_n) w_1 \frac{di_1}{dt}}{w_2^2 s + (L_{o6} + L_n) l(p_1 + 3p_2 B^2 + 5p_3 B^4 + 7p_4 B^6 + 9p_5 B^8)} \\ \frac{-l(p_1 + 3p_2 B^2 + 5p_3 B^4 + 7p_4 B^6 + 9p_5 B^8) (R_{o6} + R_n) i_2 + w_2 s w_1 \frac{di_1}{dt}}{w_2^2 s + (L_{o6} + L_n) l(p_1 + 3p_2 B^2 + 5p_3 B^4 + 7p_4 B^6 + 9p_5 B^8)} \end{pmatrix}.$$

На рис. 4 показан график работы программы.

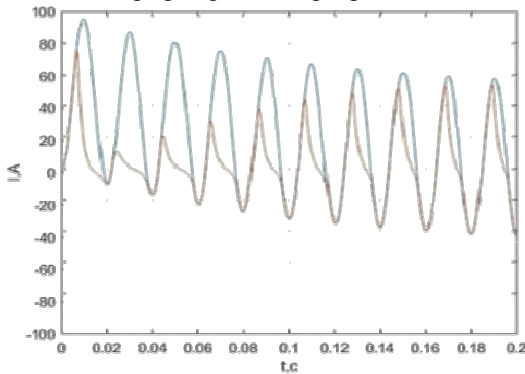


Рис. 4. График работы математической модели в MatLab

Синусоида соответствует первичному, приведенному ко вторичному току, а усеченная кривая соответствует вторичному току (характерно прослеживается искажение формы вторичного тока ТТ).

В результате проведенных исследований и расчетов сделан вывод, что аппроксимация полиномом в достаточной мере повторяет кривую намагничивания. Разработанная математическая модель отражает насыщение сердечника ТТ, позволяет получить вторичный ток по известному первичному.

Библиографический список

1. Андреев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: учеб. для вузов по спец. «Электроснабжение». – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1991. – 496 с.

2. Король Е.Г. Анализ методов моделирования магнитных характеристик электромагнитов для компенсации магнитного поля электрооборудования // Электротехника и электромеханика: науч.-практ. журн. – 2007. – № 2. – С. 31–34.

3. Таблицы и кривые намагничивания сталея [Электронный ресурс]. – URL: <https://studfiles.net/preview/5711851/>

4. Метод наименьших квадратов // Википедия – электронная энциклопедия. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Метод_наименьших_квадратов

Сведения об авторах

Иванова Инна Александровна – магистрант Оренбургского государственного университета, гр. 17-ЭЭ(м)АЭСК, г. Оренбург, e-mail: inna45879@mail.ru

Валиуллин Камиль Рафкатович – старший преподаватель кафедры «Электро- и теплоэнергетика» Оренбургского государственного университета, г. Оренбург.

Митрофанов Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент, декан электроэнергетического факультета Оренбургского государственного университета, г. Оренбург.

А.С. Морозов

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА

Нефтегазовая отрасль играет важную роль в экономическом развитии России. В настоящее время фонтанные и газлифтовые способы эксплуатации скважин используются в меньшей степени по сравнению с насосным способом эксплуатации ввиду низкой производительности. Технологический процесс добычи нефти с помощью установок погружных электроцентробежных насосов является самым энергозатратным на нефтедобывающем предприятии. Исходя из этого необходимо решать вопросы энергосбережения, которые главным образом связаны с вопросами уменьшения удельных затрат электрической энергии. Разработан алгоритм сегментации нефтедобывающих скважин на различные классы. В качестве базы данных использовалась информация о 241 нефтедобывающей скважине Пермского края. Объектом разработки являются алгоритмы кластерного анализа группы скважин для установления влияния технологических параметров на электропотребление. Разработка алгоритмов основана на различных методиках математического и статистического анализа, а также на теории электрических машин и теоретических основ электротехники.

Ключевые слова: электропотребление, оптимизация, кластерный анализ, метод главных компонент, анализ данных, погружной электродвигатель, динамический уровень, дебет жидкости.

A.S. Morozov

DEVELOPMENT OF ALGORITHMS FOR CLUSTER ANALYSIS OF ELECTRIC POWER CONSUMPTION OF ELECTRIC CENTRIFUGAL PUMP INSTALLATION

The oil and gas industry plays an important role in the economic development of Russia. At present, gas-lift methods of well operation are used to a lesser extent as compared with the pump method of operation due to low productivity. The technological process of oil production with the help of submersible electric centrifugal pumps is the most energy-intensive at an oil producing enterprise. Therefore, it is necessary to solve the issues of energy saving, which are mainly related to the issues of reducing the unit cost of electrical energy. In this paper, an algorithm for segmentation of oil producing wells into various classes has been developed. As a database, information was used on two hundred and forty-one oil-producing wells in the Perm region. The object of development is the cluster analysis algorithms for a group of wells to determine the effect of process parameters on power consumption.

The development of algorithms is based on various methods of mathematical and statistical analysis, as well as on the theory of electrical machines and the theoretical foundations of electrical engineering.

Keywords: power consumption, optimization, cluster analysis, principal component analysis, data analysis, submersible electric motor, dynamic level, fluid debit.

В настоящее время эксплуатация добывающих скважин в России осуществляется в основном с помощью УЭЦН – 61 % всего фонда, и эта доля постоянно растет.

Основными преимуществами УЭЦН являются широкий модельный ряд и возможность создания высокой депрессии за счет высоких напоров и больших глубин спуска. Для части добывающего фонда этот способ эксплуатации является практически безальтернативным [1].

Однако УЭЦН имеет существенный недостаток, обусловленный конструктивной особенностью, – низкий КПД. Особенно это характерно для малопроизводительных УЭЦН с номинальной подачей в диапазоне 10–35 м³/сут. Данная особенность УЭЦН была отмечена в работе [2]. По заключению ее авторов, коэффициент полезного действия УЭЦН в области небольших подач резко снижается. В итоге малый КПД низкопроизводительных УЭЦН формирует высокие удельные энергозатраты [1].

В общем случае для каждой скважины нужно применять конкретные мероприятия по повышению энергоэффективности, но это очень дорого и неэффективно. Вместо этого мероприятия по повышению энергоэффективности делаются для групп скважин. Но признаки, по которым выделяются эти группы скважин, не соответствуют реальным режимам работы.

Для разделения скважин на группы можно применить процедуру кластеризации, предварительно изучив значимость каждого из параметров и оценив распределение этих кластеров. Тогда мы можем утверждать, что каждый из кластеров имеет определенные одинаковые параметры, которые позволяют нам для группы этих скважин планировать одинаковые мероприятия. И самое важное – это выбрать параметры, по которым проходит кластеризация, и сам тип кластеризации.

Для оценки значимости параметров, максимально влияющих на изменение данных (имеющих максимальную выборочную дисперсию), необходимо прибегнуть к методу главных компонент.

Выбор значимых параметров. Наибольшие значения весовых коэффициентов получены у таких параметров, как динамический уровень и фактическая подача жидкости. Данные результаты подтверждаются статистическим анализом [3], на основании которого была выявлена прямо пропорциональная зависимость между мощностью, затрачиваемой на подъем жидкости, и подачей жидкости.

На основании полученных данных можно сделать вывод о том, что проверку кластерного анализа, выполненную на основании всех параметров скважин, можно осуществить путем оценки трехмерной диаграммы, параметрами которой будут являться $H_{\text{дин}}$, $Q_{\text{ж факт}}$ и $P_{\text{пзд}}$.

Результаты кластеризации. В процессе выполнения алгоритма иерархической кластеризации была получена зависимость расстояния между кластерами от этапа объединения элементов, называемая в литературе «Каменистая осыпь». Данная зависимость представлена на рис. 1.

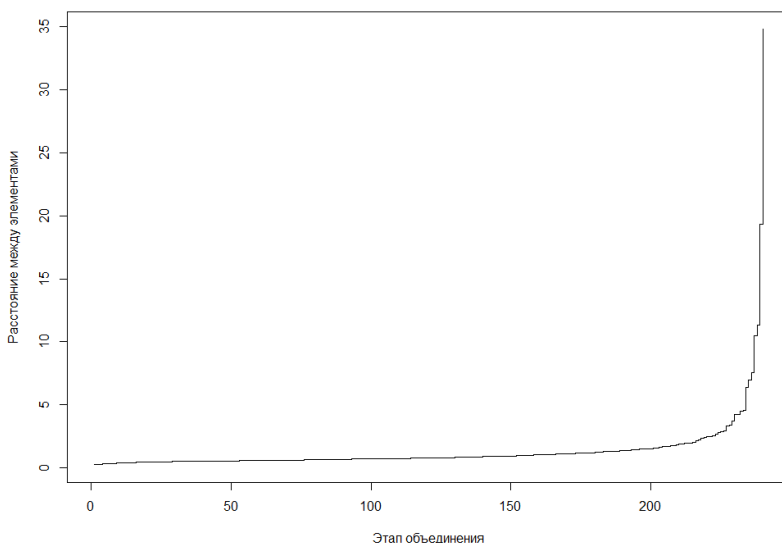


Рис. 1. График «Каменистая осыпь»

Согласно графику, центры кластеров при объединении резко отдалаются друг от друга по мере снижения количества кластеров. Это говорит о том, что сам по себе кластерный анализ имеет место быть и что все объекты не сконцентрированы вокруг одной точки, а распределены в пространстве параметров.

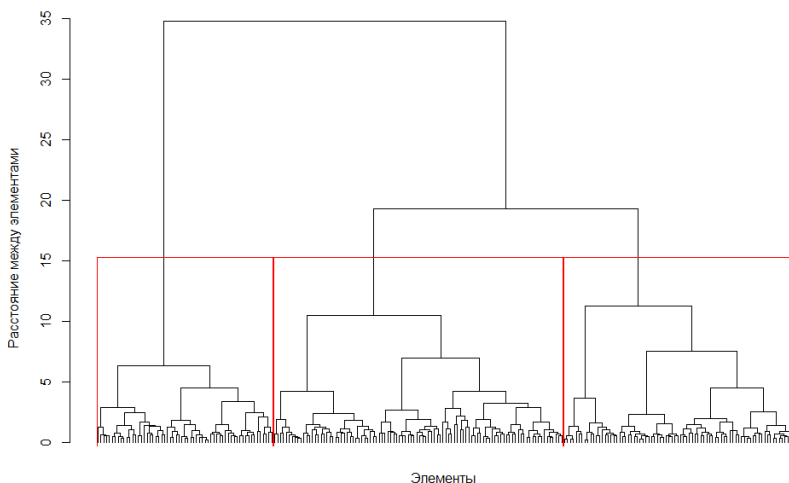


Рис. 2. Дендрограмма

Дендрограмма изображена на рис. 2.

На основании построенной дендрограммы можно сделать вывод об оптимальном количестве кластеров. Число кластеров принимаем равным трем, так как межкластерные расстояния будут много меньше при меньшем количестве кластеров и шанс пересечения кластеров возрастает. Кроме иерархического алгоритма, были реализованы алгоритм *k*-средних и метод DBSCAN.

Количественные результаты основных параметров алгоритмов кластеризации представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Результаты вычисления среднего внутрикластерного расстояния, приходящегося на один элемент кластера

Кластер	Среднее внутрикластерное расстояние на один элемент кластера		
	Метод <i>k</i> -средних	Иерархический метод	Метод DBSCAN
1	21 742,64	46 058,98	36 741,65
2	11 596,54	33 107,84	4777,959
3	11 198,81	77 051,58	32 779,89
Сумма	44 537,980 27	156 218,3911	74 299,49 595

Межкластерные расстояния для разных методов кластеризации

Кластер	Межкластерные расстояния		
	Метод k -средних	Иерархический метод	Метод DBSCAN
1–2	517 556,4	2 627 374	5 317 750
1–3	138 040,5	1 503 666	2 159 739
3–2	449 757,8	4 131 264	3 158 527
Сумма	1 105 355	8 262 304	10 636 016

На рис. 3 представлена диаграмма рассеяния данных в пространстве основных параметров для метода DBSCAN.

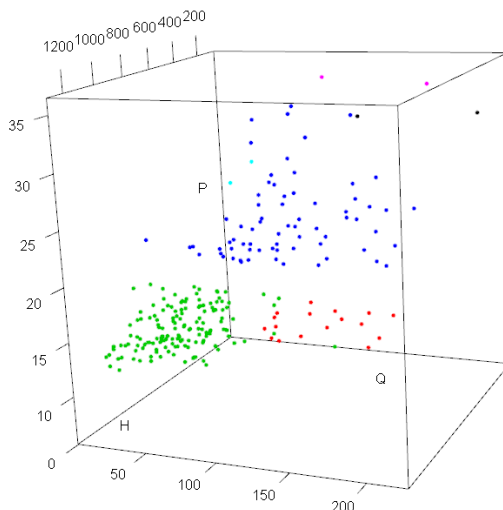


Рис. 3. Диаграмма рассеяния данных в пространстве основных параметров для метода DBSCAN

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы был разработан алгоритм кластерного анализа данных технологического процесса добычи нефти.

В результате выполнения метода главных компонент были выявлены наиболее значимые параметры УЭЦН, такие как $H_{\text{дин}}$ и $Q_{\text{ж}}$ факт, которые имеют максимальное влияние на дисперсию данных.

В программной среде Rstudio были реализованы различные методы кластеризации данных, такие как иерархический метод, метод k -средних и плотностный алгоритм DBSCAN.

По результатам кластерного анализа были построены различные диаграммы, в том числе трехмерные диаграммы рассеяния основных параметров скважин.

Полученные результаты кластеризации были обработаны с помощью математических преобразований, и сделан вывод об эффективности использования методов кластеризации.

Наибольшую эффективность показал плотностный алгоритм кластеризации DBSCAN.

В процессе разработки алгоритма кластеризации были выявлены три режима электропотребления установки электроцентробежного насоса. Проведенное исследование подтверждает зависимость режимов электропотребления от параметров технологического процесса.

Практическая значимость проведенного исследования заключается в том, что с помощью известных технологических параметров, алгоритмов кластерного анализа можно будет определять режим электропотребления УЭЦН и проводить соответствующие мероприятия по снижению электропотребления.

Библиографический список

1. Тарасов В.И., Каверин М.Н., Якимов С.Б. Сравнение энергопотребления при различных способах механизированной добычи по ряду предприятий ОАО «НК «Роснефть»» // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2012. – № 3. – С. 49–52.

2. Ивановский В.Н., Дарищев В.И., Сабиров А.А. Скважинные насосные установки для добычи нефти / РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. – М.: Нефть и газ, 2002. – 7 с.

3. Каверин М.Н., Куряев С.В. Методика планирования и анализа энергоэффективности добычи нефти // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2012. – № 3. – С. 58–62.

Сведения об авторе

Морозов Алексей Сергеевич – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ИСУП-18-2м, г. Пермь, e-mail: morozov6420@gmail.ru

Е.О. Горбачева, С.В. Митрофанов

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ РАСЧЕТА ЭНЕРГОЕМКОСТИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Описано применение нечеткой логики для расчета энергоемкости промышленного предприятия на основе весовых коэффициентов.

Ключевые слова: энергоэффективность, оценка энергоэффективности, энергоемкость, промышленное предприятие, технологический процесс, нечеткая логика.

E.O. Gorbacheva, S. V. Mitrofanov

USING OF FUZZY LOGIC FOR CALCULATING ENERGY INTENSITY OF INDUSTRIAL ENTERPRISES

This article is describing using of fuzzy logic for calculating energy intensity of industrial enterprises based on weights coefficients

Keywords: energy efficiency, energy efficiency assessment, energy intensity, industrial enterprise, technological process, fuzzy logic.

Активная политика государства в сфере повышения энергоэффективности не только физических лиц, но и промышленных предприятий обязывает всех потребителей электроэнергии не только вести учет повышения электроэнергии, но и организационные мероприятия по повышению энергоэффективности. Точные анализ и расчет энергоэффективности предприятия дадут понять, какие проблемы есть в сфере энергопотребления, и представят возможность правильно спланировать повышение энергоэффективности.

Одним из основных показателей энергоэффективности промышленных предприятий является энергоемкость предприятия. В разных источниках данный показатель трактуют по-разному. В основном разделяют энергоемкость, которая рассчитывается как отношение величины потребляемой электроэнергии к объему произведенной продукции и отношение величины потребляемой энергии в стоимостном выражении к величине реализованной продукции. Но одним из более точных трактовок данного показателя является энергоемкость, которая рассчитывается с использованием весовых коэффициентов,

которые, в свою очередь, отражают тот или иной этап развития предприятия. Такими весовыми коэффициентами являются учет, организация, контроль, нормирование, планирование, анализ.

Как правило, данные коэффициенты рассчитываются с применением экспортного оценивания. Каждый эксперт на основании своего опыта и квалификации выставляет тот или иной ранг, а точнее приоритет для коэффициента, после прохождения алгоритма обработки данных на выходе получается коэффициент, который варьируется от 0 до 1.

$$\Theta_m = \frac{x_1\Phi1 + x_2\Phi2 + x_3\Phi3 + x_4\Phi4 + x_5\Phi5 + x_6\Phi6}{x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6},$$

где $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$ – весовые коэффициенты, соответственно учет, нормирование, планирование, организация, планирование, анализ; $\Phi1, \Phi2, \Phi3, \Phi4, \Phi5, \Phi6$ – значения коэффициентов, которые отражают соответственно качество выполнения плана по выпуску продукции, соблюдение норм расхода ТЭР, изменение энергетической составляющей себестоимости произведенной продукции, выполнение плана по установке (замене) приборов учета, изменение частоты проведения анализа энергопотребления, изменение величины потерь и выявленного объема нерационально использованных энергоресурсов.

Применение нечеткой логики для определения весовых коэффициентов имеет более актуальную информацию, так как экспертное оценивание влечет за собой субъективные мнения, а также может исказить информацию, актуальную на данный момент. Для применения расчета применяется алгоритм Мамдани (от имени создателя Э. Мамдани), который изначально был предложен в качестве метода для управления паровым двигателем. Предложенный им алгоритм, основанный на нечетком логическом выводе, позволил избежать чрезмерно большого объема вычислений и был по достоинству оценен специалистами. На основании входных лингвистических переменных, написанных правил для расчета и определения приоритета выходной переменной для того или иного входного параметра, при помощи алгоритма, на выходе получаем нелингвистические переменные, т.е. значение коэффициента (рис. 1, 2).

На основании составленных правил для вычисления коэффициентов, в зависимости от приоритетности того или иного компонента в стадии производства и производственном процессе отрасли, получаем графики выходных параметров и значения коэффициентов (рис. 3).

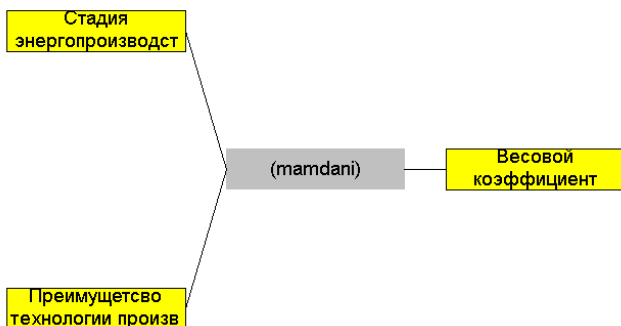


Рис. 1. Блок-схема входных и выходных параметров

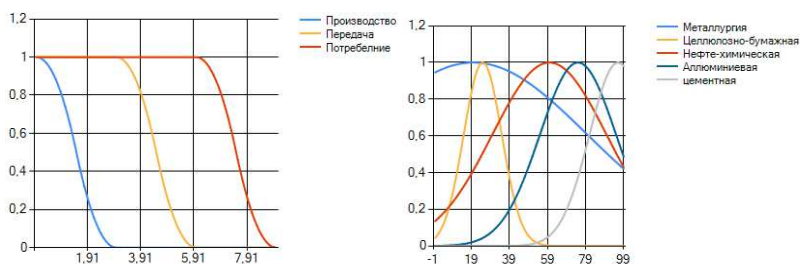


Рис. 2. Графики функций для входной и выходной переменных

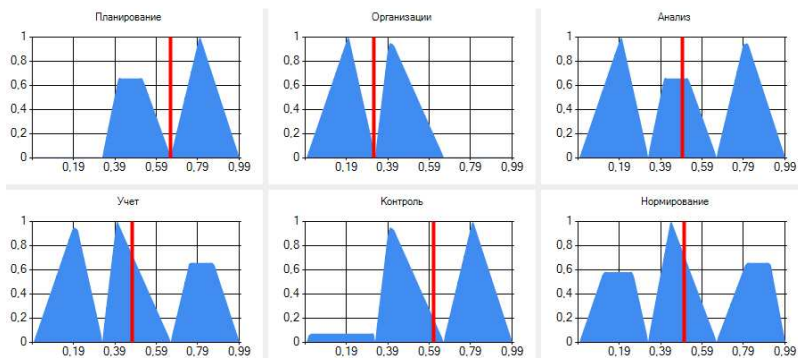


Рис. 3. Графики полученных функций, вычисленные с помощью нечеткой логики

Таким образом, сопоставив и вычислив значение энергоемкости с весовыми коэффициентами, найденными с помощью нечеткой логики, получим значение показателя, которое полностью отражает

состояние энергоемкости предприятия. Несколько входных параметров отражают состояние предприятия, актуальное на данный момент. На основании нечеткой логики и изменения входного параметра «Преимущество технологического производства» показатель можно вычислять и для других отраслей промышленности, а при составлении обобщенного списка с одинаковыми технологиями производства или каким-либо признаком объединения можно выполнять расчет не по одному предприятию, а по всей отрасли, а также вычислять региональное значение энергоемкости.

Сведения об авторах

Горбачева Екатерина Олеговна – магистрант Оренбургского государственного университета, гр. 17-ЭЭ(м)АЭСК, г. Оренбург, e-mail: ucheba5696@mail.ru

Митрофанов Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент, декан электроэнергетического факультета Оренбургского государственного университета, г. Оренбург.

А.Ю. Сухоруков, А.Г. Щербинин

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА РАБОТЫ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ ПРИ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ

Рассматривается модель работы силового кабеля в режиме короткого замыкания. Получено поле распределения векторного магнитного потенциала в зависимости от того, между какими конструктивными элементами произошло короткое замыкание.

Ключевые слова: короткое замыкание, векторный магнитный потенциал, силовые кабельные линии.

A.Yu. Suhorukov, A.G. Sherbinin

NUMERICAL RESEARCH OF THE OPERATION MODE OF POWER CABLES AT SHORT CIRCUIT

In this article, the model of operation of the power cable in the mode of short circuit is considered. Fields of distribution of magnetic vector potential depending on between what structural elements there was a short circuit are received.

Keywords: short circuit, magnetic vector potential, power cable lines.

В результате протекания электрического тока вокруг кабеля возникает магнитное поле. Это поле действует на проложенные рядом кабели. И при протекании таких больших токов, как при коротком замыкании, возникают силы, которые могут повредить конструкцию кабеля и кабельной линии.

При рассмотрении модели режима короткого замыкания был выбран кабель ПвВ 1×800/35-10 [1]. Параметры конструктивных элементов кабеля указаны в таблице.

Параметры кабеля марки ПвВ 1×800/35-10

№ п/п	Наименование	Значение
1	Радиус жилы, мм	15,96
2	Толщина изоляции, мм	3,4
3	Диаметр проволоки экрана, мм	1
4	Толщина ленты экрана, мм	0,2
5	Толщина оболочки, мм	2,5

Для исследования режима работы при коротком замыкании была создана плоская модель из двух кабелей одинаковой конструкции. Модель приведена на рис. 1.

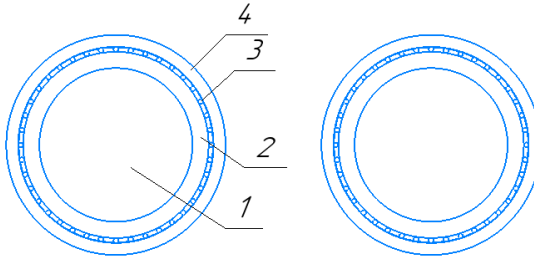


Рис. 1. Модель для исследования режима короткого замыкания:
1 – токопроводящая жила, 2 – изоляция, 3 – экран, 4 – оболочка

В процессе решения были сделаны следующие допущения:

- процесс стационарный;
- в направлении оси z поле не изменяется, поэтому рассматривается двухмерная задача;
- электромагнитные параметры материалов постоянны.

С учетом сделанных допущений дифференциальное уравнение примет вид:

– уравнение Пуассона для векторного магнитного потенциала A [2]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_y} \cdot \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_x} \cdot \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -j + \left(\frac{\partial H_{cy}}{\partial x} - \frac{\partial H_{cx}}{\partial y} \right), \quad (1)$$

где μ – магнитная проницаемость; j – плотность тока, A/m^2 ; H_c – коэрцитивная сила, A/m .

Данное уравнение дополняется следующими граничными условиями:

На границе сред принимаем

$$\vec{A}_1 = \vec{A}_2. \quad (2)$$

На границе рассматриваемой области задаем

$$\frac{\partial \vec{A}}{\partial n} + \frac{1}{R} \vec{A} = 0. \quad (3)$$

Система полученных уравнений (1)–(3) решалась методом конечных элементов в среде ANSYS Maxwell. Ток короткого замыкания принимаем равным 90 кА. По полученным значениям напряженности магнитного поля H и магнитной индукции B находим магнитную силу из уравнения (4).

Уравнение магнитной силы [2]:

$$F = \frac{1}{2} \oint (H(nB) + B(nH) - n(HB)) ds, \quad (4)$$

где H – напряженность магнитного поля, А/м; B – магнитная индукция, Тл; n – единичный вектор внешней нормали к поверхности.

Полученные результаты представлены на рис. 2–4.

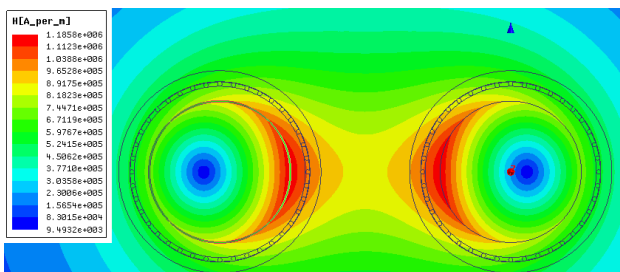


Рис. 2. Распределение магнитной напряженности H при коротком замыкании жила–жила

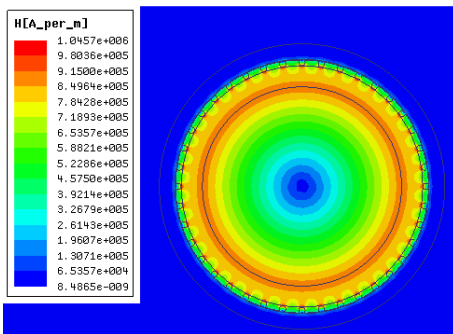


Рис. 3. Распределение магнитной напряженности H при коротком замыкании жила–экран

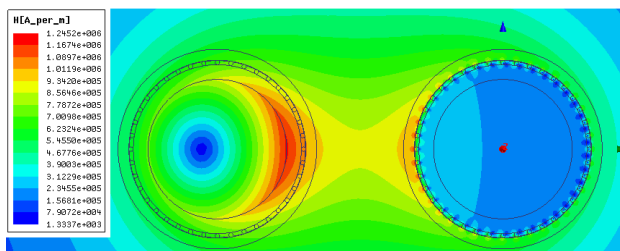


Рис. 4. Распределение магнитной напряженности H при коротком замыкании жила–экран другого кабеля

Далее по полученным распределениям находим магнитную силу F по формуле (4). Исходя из полученных результатов можно сделать выводы по разным типам короткого замыкания:

– КЗ жила–жила: в этом случае возникающая магнитная сила действует на жилы кабелей, заставляя кабели отталкиваться друг от друга при разнонаправленных токах и притягиваться при однонаправленных. Тогда устойчивость кабельной линии при коротком замыкании будет определяться прочностью креплений;

– КЗ жила–экран: в этом случае магнитное поле не выходит за пределы кабеля, поэтому токи короткого замыкания не влияют на соседний кабель. Тогда устойчивость кабельной линии зависит от прочности материалов кабеля;

– КЗ жила–экран другого кабеля: в этом случае магнитные силы действуют на жилу одного кабеля и экран другого. Тогда устойчивость кабельной линии будет зависеть от прочности креплений и прочности материалов кабелей.

Исходя из полученных данных можно сказать, что при протекании токов короткого замыкания в силовых кабелях возникают значительные магнитные силы, способные разрушить конструкцию кабельной линии. Данные об этих силах можно использовать для определения прочности креплений, которые смогут выдержать силовое влияние токов короткого замыкания в силовых кабельных линиях.

Библиографический список

1. ГОСТ Р 55025–2012. Кабели силовые с пластмассовой изоляцией на номинальное напряжение от 6 до 35 кВ включительно.
2. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 5.8. Руководство пользователя / Производственный кооператив ТОР Санкт-Петербург. ELCUT. – 2010.

Сведения об авторах

Сухоруков Алексей Юрьевич – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КТЭИ-15-16, г. Пермь, e-mail: aleksey.suhorukov@gmail.com

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

О.А. Билоус, А.В. Кухарчук

**К ВОПРОСУ О ПРИМЕНЕНИИ НЕСЕЛЕКТИВНЫХ
МЕЖДУФАЗНЫХ ТОКОВЫХ ОТСЕЧЕК В СЕТЯХ 6–10 кВ
НЕФТЕДОБЫВАЮЩИХ РАЙОНОВ**

Выполнен анализ системы электроснабжения и уставок защит подстанции 110/6 кВ нефтедобывающих районов с целью выявления особенностей существующих систем релейной защиты. Анализ аварийных режимов в системе электроснабжения показал, что время действия релейной защиты может превышать критическую длительность нарушения электроснабжения ответственных механизмов и технологических процессов. Выполнена оценка возможности и особенностей применения неселективной токовой отсечки.

Ключевые слова: релейная защита, максимальная токовая отсечка, межфазная токовая отсечка, неселективная междуфазная токовая отсечка, время действия релейной защиты, ускорение действия релейной защиты.

O.A. Bilous, A.V. Kuharchuk

**TO THE QUESTION OF THE APPLICATION OF NO SELECTIVE
BETWEEN PHASE CURRENT CUTS IN 6-10 kV NETWORKS
OF OIL PRODUCING AREAS**

This article analyzes the power supply system and protection settings of a 110/6 kV substation in oil-producing areas in order to identify the features of existing relay protection systems. Analysis of emergency modes in the power supply system showed that the duration of the relay protection may exceed the critical duration of a power failure of the responsible mechanisms and technological processes. The evaluation of the possibility and features of the application of non-selective current cut-off.

Keywords: relay protection, maximum current cutoff, interphase current cut-off, non-selective interphase current cut-off, time of action of relay protection, acceleration of action of relay protection.

Современная электроэнергетическая система нефтяных промыслов состоит из генераторов, трансформаторов и потребителей различного рода и представляет собой сложный комплекс. Задача выбора уставок релейной защиты и автоматики таких электроэнергетических систем может иметь особенности и требовать нестандартных подходов.

Электроподстанции, предназначенные для питания различных нефтяных промыслов, вспомогательных производств и сторонних

потребителей, как правило, имеют два ввода со стороны высокого напряжения. На них установлено два двух- или трехобмоточных силовых трансформатора. Обмотки среднего напряжения (при наличии) и низкого напряжения силовых трансформаторов подключены к одиночным секционированным шинам распределительных устройств. Большинство отходящих воздушных линий 6–35 кВ используются для питания нескольких трансформаторных подстанций 6–35/0,4 кВ различной мощности, подключаемых к отпайкам от линии через предохранители. Предохранителями осуществляется защита силовых трансформаторов от перегрузок и коротких замыканий на стороне низкого напряжения. В таких сетях повреждения в конце линии и за трансформаторами 6–35/0,4 кВ обычно сопровождаются протеканием токов, близких к максимальным нагрузочным, а при малой протяженности линий – низкой чувствительностью междофазных токовых отсечек [1]. В качестве защиты линий от коротких замыканий и обеспечения дальнего резервирования, как правило, используются максимальные токовые защиты, реагирующие на полные токи фаз. В зависимости от условий максимальная токовая защита выполняется одноступенчатой или для ускорения ликвидации близких коротких замыканий двухступенчатой.

Селективные межфазные токовые отсечки обычно выполняются таким образом, чтобы их зоны действия не входили в зону действия смежной нижестоящей защиты, это достигается отстройкой от токов короткого замыкания в конце защищаемого участка и, как следствие, сокращением зоны действия защиты [1]. Правила требуют, чтобы межфазная токовая отсечка, выполняющая роль дополнительной защиты, имела коэффициент чувствительности более 1,2 при коротком замыкании в месте установки защиты в условиях, наиболее благоприятных для чувствительности [2].

Объектом исследования является участок системы электроснабжения, представленный на рисунке в виде схемы, показывающей общую структуру сети и основные элементы схемы замещения, использованной для расчетов токов короткого замыкания. На рисунке показаны основные характеристики силового оборудования. Следует отметить, что на рассматриваемой ПС 110/6 кВ токовые цепи защит на стороне 6 кВ имеют трехфазное исполнение.

Ток короткого замыкания в максимальном режиме работы энергосистемы на секциях шин 6 кВ подстанции 110/6 кВ составляет 4,82

и 4,18 кА для трехфазного и двухфазного токов соответственно. Результаты расчетов токов короткого замыкания для участка системы электроснабжения в максимальном режиме работы энергосистемы представлены в табл. 1 (токи приведены к стороне 6 кВ, точки коротких замыканий с четными номерами расположены на стороне 0,4 кВ).

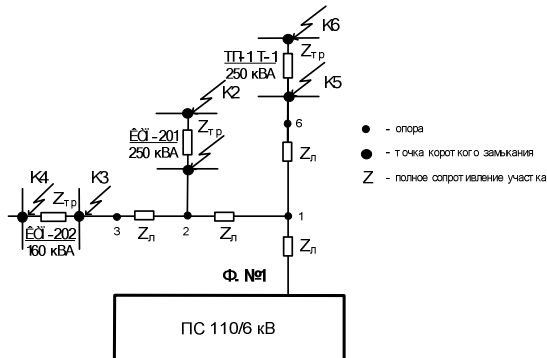


Рис. Схема участка системы электроснабжения

Таблица 1

Результаты расчета токов короткого замыкания
в максимальном режиме работы энергосистемы

Точка КЗ	K1	K2	K3	K4	K5	K6
$I_{КЗ}, A$	3901	316,1	3785	283,1	3474	313,4

Микропроцессорные устройства защиты имеют значительный потенциал для улучшения эксплуатационных характеристик защит распределительных сетей 6–35 кВ. Микропроцессорные системы защиты и автоматики работают с оцифрованными сигналами. Этот подход дает возможность формировать разнообразные алгоритмы, например выделение симметричных составляющих, разложение на гармонические составляющие и т.д. [3]. Отстройка межфазной токовой отсечки от бросков тока намагничивания при применении микропроцессорных устройств защит, как правило, не требуется: специальные алгоритмы распознают токи намагничивания, например по токам второй гармоники, и в данной статье не рассматривается [4].

Рассмотрим вопрос выбора уставки токовой отсечки для фидера № 1 (Ф. № 1). Поскольку подключение силовых трансформаторов 6/0,4 кВ осуществляется через предохранители, необходимо ограничить

зону действия междуфазной токовой отсечки путем отстройки от токов короткого замыкания в зоне действия предохранителей. В табл. 2 представлены результаты выбора уставки для фидера № 1.

Таблица 2

Результаты выбора уставки междуфазной токовой отсечки фидера № 1

№ п/п	Точка КЗ	K1	K3	K5
1	$I_{\text{кз}}^{(3)}, \text{ А}$	3901	3785	3474
2	$I_{\text{co}} \geq k_{\text{н}} I_{\text{кз.мах}}^{(3)}, \text{ А}$	4681	4542	4169
3	Принятый $I_{\text{co}}, \text{ А}$	4681		
4	$k_{\text{ч}} \text{ к } I_{\text{кз.мах}}^{(2)} \text{ на шинах 6 кВ}$	0,89		
5	$k_{\text{ч}} \text{ к } I_{\text{кз.мах}}^{(3)} \text{ на шинах 6 кВ}$	1,02		

Анализ результатов выбора уставки в табл. 2 показывает, что применение селективной токовой отсечки неэффективно. В связи с тем, что уставка максимальной токовой защиты с выдержкой времени составляет 550 А / 0,5 с, отключение коротких замыканий на линии с выдержкой времени 0,5 с будет приводить к значительным снижениям напряжения на шинах 6 кВ и оказывать влияние на режим работы других потребителей подстанции.

Ускорение действия защиты возможно при применении неселективной токовой отсечки, действия которой устраняются за счет автоматики повторного включения. Уставка неселективной токовой отсечки может быть принята с учетом несрабатывания при самозапуске нагрузки и нечувствительности к коротким замыканиям на стороне 0,4 кВ. Для рассматриваемого примера принято, что $k_{\text{сз}} = 1,5$, $k_{\text{н}} = 1,4$ с учетом наличия аperiodической составляющей в токе самозапуска нагрузки. Результаты отстройки неселективной токовой отсечки от токов короткого замыкания на стороне 0,4 кВ представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты выбора уставок неселективной токовой отсечки

№ п/п	Точка КЗ	K2	K4	K6
1	$I_{\text{кз}}^{(3)}, \text{ А}$	316	283	313
2	$I_{\text{co}} \geq k_{\text{н}} I_{\text{кз.мах}}^{(3)}, \text{ А}$	380	340	376
3	$I_{\text{co}} \geq k_{\text{н}} k_{\text{сз}} I_{\text{раб.мах}} / k_{\text{н}} \geq 1,4 \cdot 1,5 \cdot 63,6 / 0,95$	140,6		
4	Принятый $I_{\text{co}}, \text{ А}$	380		
5	$k_{\text{ч}} \text{ к } I_{\text{кз.мах}}^{(2)} \text{ на шинах 6 кВ}$	11,0		
6	$k_{\text{ч}} \text{ к } I_{\text{кз.мах}}^{(3)} \text{ на шинах 6 кВ}$	12,7		

В результате наладки микропроцессорной защиты линии должно быть выполнено параметрирование ступени неселективной токовой отсечкой с выводом ступени защиты после АПВ на время 0,6 с. Установка максимальной токовой защиты с выдержкой времени позволяет действовать селективно с предохранителями после блокировки неселективной отсечки. Применение предложенного подхода позволяет ускорить действие защит при неустановившихся коротких замыканиях на линиях 6–35 кВ и, следовательно, в ряде случаев сократить длительность провалов напряжения на шинах 6–35 кВ.

Библиографический список

1. Шабад М.А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей ПЭИПК / ООО «Политехника-сервис». – 4-е изд., перераб. и доп. – СПб., 2003.
2. Правила устройства электроустановок: Все действующие разделы ПУЭ-6 и ПУЭ-7. – Новосибирск: Изд-во Сиб. ун-та, 2007. – Вып. 7.
3. Романюк Ф.А., Тишечкин А.А., Булойчик Е.В. Определение вида повреждения на линиях распределительных сетей в объеме функций микропроцессорных токовых защит // Энергетика. Известия вузов и энергетических объединений СНГ. – 2011. – № 4. – С. 5–10.
4. Шнеерсон Э.М. Цифровая релейная защита. – М.: Энергоатомиздат, 2007.

Сведения об авторах

Билоус Ольга Анатольевна – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КПИ-18-1м, г. Пермь, e-mail: boa@msa.pstu.ac.ru

Кухарчук Александр Васильевич – старший преподаватель кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: r805@mail.ru

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

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СШИВКИ ПОЛИЭТИЛЕНА В АЗОТНОЙ СРЕДЕ

Представлена математическая модель процесса сшивки полиэтилена в вулканизационной трубе в среде азота. Получены зависимости распределения температур по длине линии вулканизации, а также степени вулканизации от скорости производства. Исходя из полученных данных был подобран оптимальный режим сшивания.

Ключевые слова: математическая модель, полиэтилен, кабель, вулканизационная труба, вулканизация, сшивка, степень сшивки, тепломассоперенос.

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

MATHEMATICAL MODELING OF THE POLYETHYLENE CROSSLINKING PROCESS IN NITROGEN ENVIRONMENT

This article presents a mathematical model of the polyethylene crosslinking process in a vulcanization pipe in a nitrogen medium. The dependences of temperature distribution along the length of the vulcanization line, as well as the degree of vulcanization on the production rate, are obtained. Based on the data obtained, the optimal stitching mode was selected.

Keywords: mathematical model, polyethylene, cable, vulcanization tube, vulcanization, crosslinking, crosslinking degree, heat and mass transfer.

Для того чтобы улучшить электрические и механические характеристики полиэтилена, производят его сшивку или, как еще называют этот процесс, вулканизацию. Суть процесса сшивки состоит в том, что происходит обработка полиэтилена разными способами. В результате между молекулами создаются дополнительные поперечные связи, что позволяет улучшить характеристики материала. Подробно процессы сшивания описаны в статье [1].

В производстве используют три технологии сшивания: пероксидная сшивка, силановая сшивка и радиационная сшивка. Влияние разных способов сшивания на свойства изоляции описано в статье [2]. В ней экспериментально доказано и рассчитано влияние способов на строение, кристалличность и температуру плавления сшитого полиэтилена.

При рассмотрении процесса пероксидной сшивки был выбран кабель марки ПвП-10 1×150(мк)/25 [3]. Необходимые для расчета параметры кабеля приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры кабеля марки ПвП-10 1×150(мк)/25

№ п/п	Наименование	Значение
1	Радиус жилы, мм	6,7
2	Полупроводящий экран по жиле, мм	0,6
3	Толщина изоляции, мм	3,4
4	Полупроводящий экран по изоляции, мм	0,6

Для сшивки используется линия непрерывной вулканизации наклонного типа EPL 50 фирмы Maillefer. В качестве среды для вулканизации используется азот. Характеристики линии, используемые для расчета, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры линии вулканизации

№ п/п	Наименование	Значение
1	Общая длина трубы, м	168
2	Длина зоны нагрева, м	54
3	Длина зон охлаждения, м	114
4	Диаметр трубы вулканизации, мм	250
5	Диаметр трубы охлаждения, мм	200
6	Давление азота в трубе, атм	20

Схематично используемая линия вулканизации изображена на рис. 1.

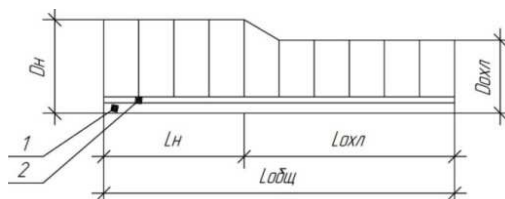


Рис. 1. Схема линии вулканизации: $L_{\text{общ}}$ – общая длина трубы; $L_{\text{н}}$ – длина зоны нагрева; $L_{\text{охл}}$ – длина зоны охлаждения; $D_{\text{н}}$ – диаметр трубы вулканизации; $D_{\text{охл}}$ – диаметр трубы охлаждения; 1 – токопроводящая жила; 2 – изоляция

Зона нагрева разделена на девять секций по 6 м, а зона охлаждения на 19 секций также по 6 м. Решаемая задача – осесимметричная. Начальная температура жилы – 90 °С. Начальная температура полимера – 120 °С. В табл. 3 представлены заданные значения температуры по зонам.

Температурный режим зон вулканизации

Температура по зонам трубы, °С										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
360	380	400	420	450	360	250	185	90	60	20

Для упрощения решения были сделаны следующие допущения:

- заменена геометрия трубы с наклонной на горизонтальную;
- теплофизические свойства материалов кабеля постоянны;
- на границах раздела разнородных сред реализуется условие идеального теплового контакта.

С учетом сделанных допущений система дифференциальных уравнений примет следующий вид:

– уравнения движения:

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

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

$$\rho_a(T) = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)]; \quad (3)$$

– уравнение неразрывности

$$\frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(rv_r)}{\partial r} = 0; \quad (4)$$

– уравнение энергии

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

– уравнения физические:

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

где ρ, c, λ – соответственно плотность, кг/м³; теплоемкость, Дж/кг·°С;

коэффициент теплопроводности, Вт/м·°С; τ_{ij} – тензор напряжений;

μ – вязкость, Па·с; T – температура, С; V_i – компоненты вектора скорости, м/с [4].

Система полученных уравнений (1)–(6) решалась методом конечных элементов в среде ANSYS. Было проведено исследование на сходимость, при котором отслеживалась максимальная температура жилы в зависимости от количества элементов сетки (N) и количества итераций (n) до тех пор, пока ее величина перестанет изменяться. Результаты расчета показаны на рис. 2.

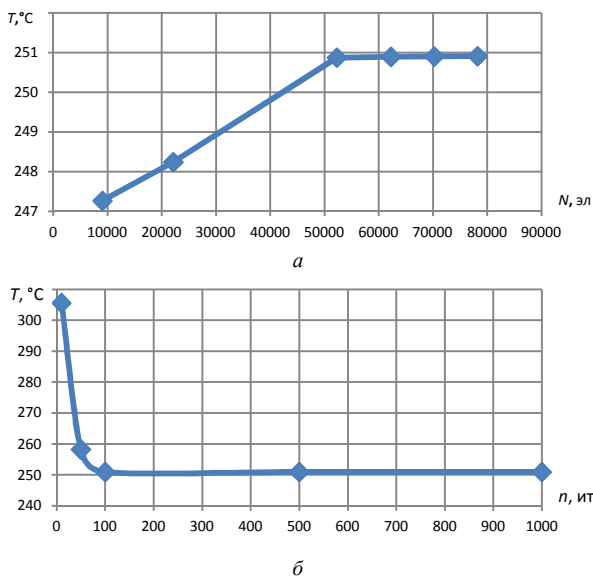


Рис. 2. Графики распределения температуры в зафиксированной точке, в зависимости от количества элементов сетки (*а*); количества итераций (*б*)

Из графиков рис. 2 видно, что для получения значений, не зависящих от числа элементов сетки и количества расчетных итераций, необходимо использовать 62 тысячи элементов и более 100 расчетных итераций.

В результате было получено распределение температуры поверхности жилы и изоляции по длине трубы при изменении скорости изолирования (рис. 3). На рис. 3 представлены зависимости распределения значений температуры на поверхности жилы и изоляции по длине вулканизационной трубы от скорости прохождения заготовки. Проанализировав данный график, можно сказать, что увеличение скорости дает в результате более плавный прогрев. При изначальной скорости 0,25 м/с температура в конце зоны нагрева на поверхности жилы составляет 172 °С, а на поверхности изоляции 358 °С. При уменьшении скорости до 0,2 м/с температура на жиле возрастает на ~20 %, а на изоляции 5 %. При увеличении скорости до 0,3 м/с температура уменьшается на жиле 11 %, а на изоляции 1,2 %. К концу охлаждающей трубы изоляция остывает до 50 °С, что позволяет без вреда производить намотку на приемные барабаны.

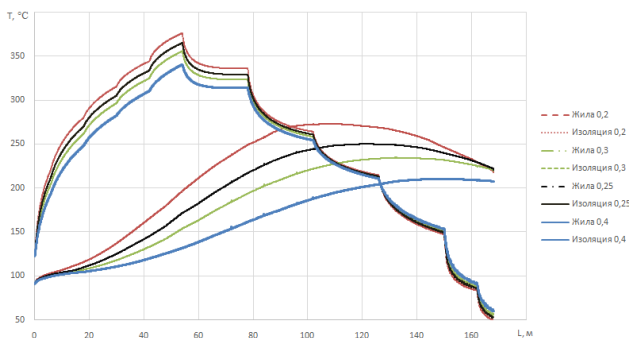


Рис. 3. Семейство кривых распределения значений температуры на поверхностях жилы и изоляции

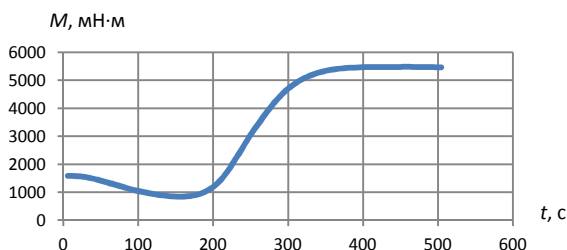


Рис. 4. Зависимость крутящего момента от времени и температуры вулканизации

Для описания процесса сшивки было проведено экспериментальное исследование образца сшиваемого полиэтилена на реометре. В ходе эксперимента была получена зависимость крутящего момента от времени сшивки при температуре 190 °С (рис. 4).

Было принято, что степень сшивки при минимальном моменте была нулевой. А при достижении максимума степень сшивки составляла 100 %. На основе этого предположения по формуле (7) была рассчитана степень сшивки и построена ее зависимость от времени сшивки (рис. 5).

$$\varphi_{tT} = \frac{M_{tT} - M_{\text{MINT}}}{M_{\text{MAXT}} - M_{\text{MINT}}}. \quad (7)$$

На рис. 5 видно, что степень сшивки в 90 % достигается за 240 с при температуре 190 °С. В ходе работы было сделано предположение, что сшивка начинается при достижении 150 °С.

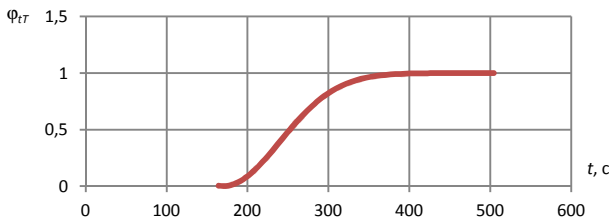


Рис. 5. График зависимости степени сшивки от времени

Таким образом, начало отсчета ведется от длины, на которой внутренние слои изоляции прогреются до 150 °С. Для расчета степени сшивки использовалась формула

$$\varphi = \frac{a}{1 + \left(\frac{t}{b}\right)^c},$$

где a , b , c – эмпирические константы; t – время, с.

Для определения скорости изолирования необходимо знать степень сшивки изоляции по длине вулканизационной трубы.

В ходе исследования были получены зависимости степени сшивки по длине вулканизационной трубы (рис. 6). На рис. 6 можно увидеть, что при скорости 0,2–0,3 м/с изоляция кабеля сшивается полностью уже на длине 90–130 м. При рассмотрении степени сшивки на расстояние 80 м при различных скоростях можно увидеть, что с увеличением скорости на 0,1 м/с степень сшивки уменьшается на 40 %. Это говорит о том, что есть возможность повысить скорость изолирования без потери качества сшивки.

При скорости 0,4 м/с сшивка начинается на расстоянии 62 м и продолжается до конца вулканизационной трубы. Степень сшивки на данный момент составит 98 %.

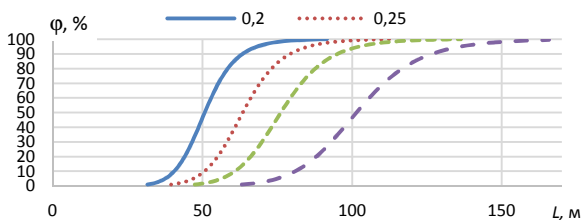


Рис. 6. Кривые зависимости степени сшивки от скорости по длине вулканизационной трубы

Исходя из полученных данных можно сказать, что при скорости 0,4 м/с полиэтилен сшивается на 98 %, что будет говорить о высоких термических и механических характеристиках изоляции. В остальных случаях сшивка изоляции в заготовках будет происходить раньше времени, а значит, при таких параметрах процесс сшивки будет нецелесообразен.

Библиографический список

1. Баочжун Х. Моделирование свойств сшитого полиэтилена // Актуальные проблемы современной науки. – 2005. – № 5.
2. Ли Чанг Минг, Хан Баз Хонг. Сравнение влияний разных способов сшивания на свойства полиэтилена // Актуальные проблемы современной науки. – 2005. – № 5.
3. ГОСТ Р 55025–2012. Кабели силовые с пластмассовой изоляцией на номинальное напряжение от 6 до 35 кВ включительно.
4. Труфанова Н.М. Переработка полимеров. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2009.

Сведения об авторах

Корелин Артем Александрович – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КТЭИ-15-1б, 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

М.С. Никитин, С.Ф. Тюрин

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ТОПОЛОГИИ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОГО ИНВЕРТОРА

Описывается реализация инверторов на базе КМОП-транзисторов. Произведена реализация топологии инвертора на базе двух КМОП-транзисторов и отказоустойчивого инвертора на базе восьми КМОП-инверторов, на основе которых можно сделать вывод о том, что повышение надежности отразилось на скорости работы инвертора.

Ключевые слова: инвертор, топология, КМОП-транзистор, отказоустойчивость.

M.S. Nikitin, S.F. Tyurin

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF FAULT-TOLERANT INVERTER TOPOLOGY

The article describes the implementation of inverters based on CMOS transistors. Produced by the implementation of the topology of the inverter 2 on the basis of CMOS transistors and fault-tolerant inverter 8 on the basis of CMOS inverters. On the basis of which it can be concluded how the increase in reliability has affected the speed of the inverter.

Keywords: inverter, topology, CMOS transistor, fault tolerance.

В настоящее время наблюдается бурное развитие технологического процесса полупроводникового производства, при котором происходит уменьшение полупроводниковых структур, способствующее улучшению характеристик. Примерами таких характеристик будет снижение стоимости, энергопотребления и размеров и увеличение рабочей частоты.

При достаточном запасе вышеупомянутых характеристик важным фактором при оценке системы становится ее отказоустойчивость (надежность).

Отказоустойчивость – это свойство технической системы сохранять свою работоспособность после отказа одного или нескольких составных компонентов.

Рассмотрим схему инвертора на комплементарных МОП-транзисторах (КМОП) (рис. 1).

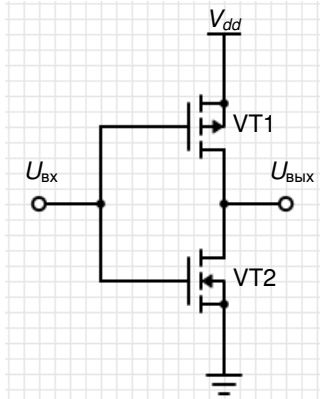


Рис. 1. Схема инвертора на КМОП-транзисторах

Данная схема содержит два элемента, *p*-канальный и *n*-канальный МОПы. При подаче сигнала высокого уровня (1) транзистор VT1 закрыт, а VT2 открыт, при этом на выходе получаем сигнал низкого уровня (0), а при подаче сигнала низкого уровня – наоборот.

Построим топологию инвертора (рис. 2) и проверим работоспособность, подав питание 0,35 В и импульсы с частотой 1,25 ГГц. Получившиеся временные диаграммы представлены на рис. 3.

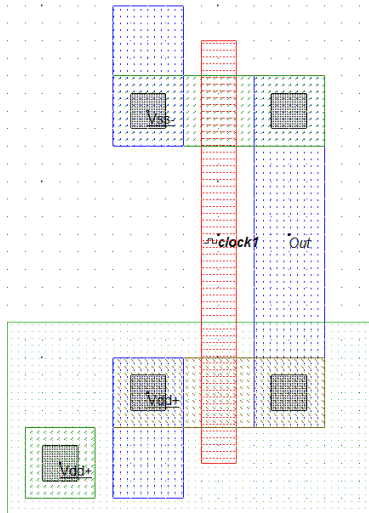


Рис. 2. Топология инвертора на КМОП-транзисторах

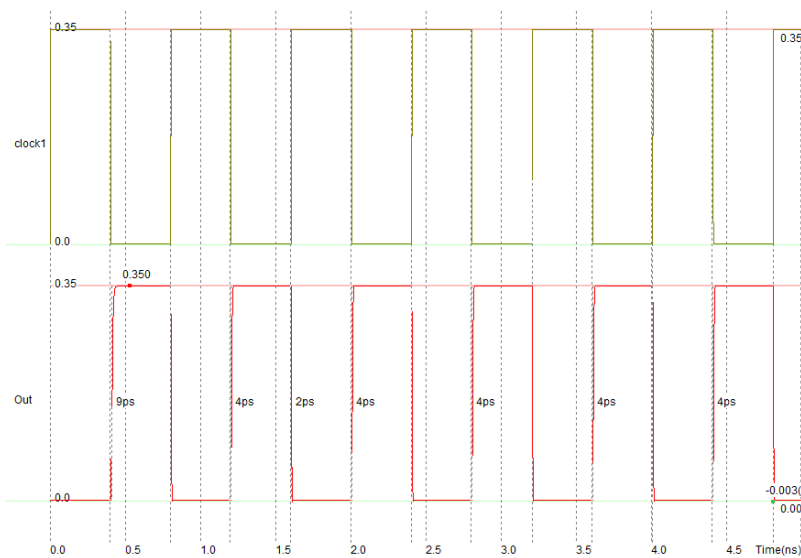


Рис. 3. Временная диаграмма инвертора на КМОП-транзисторах

Промоделируем работу топологии при том же напряжении, но с большей частотой 2,5 ГГц. Результаты представлены на рис. 4.

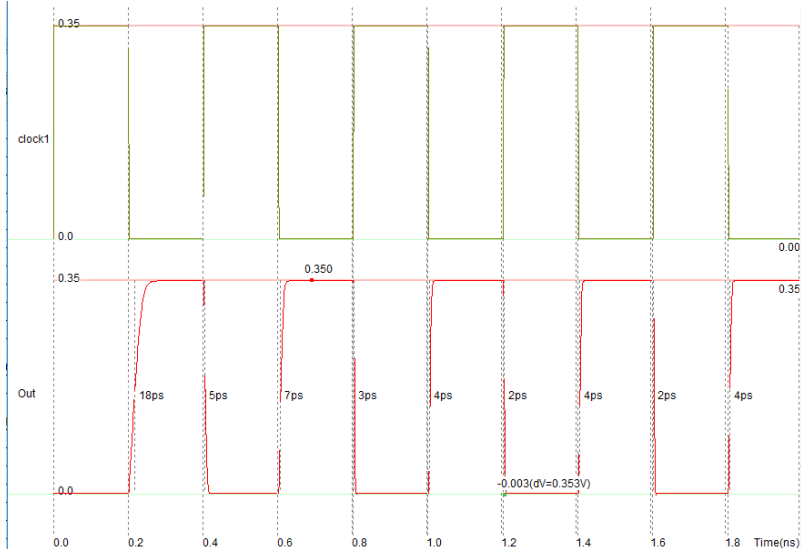


Рис. 4. Временная диаграмма инвертора на КМОП-транзисторах (с частотой 2,5 ГГц)

Как видно на диаграмме, инвертор исправно работает. Но такая топология очень уязвима к отказам. При выводе из строя одного элемента вся схема выходит из строя. Промоделируем ошибку «константа 1» на VT1 (рис. 5). Временная диаграмма симуляции данной ошибки представлена на рис. 6.

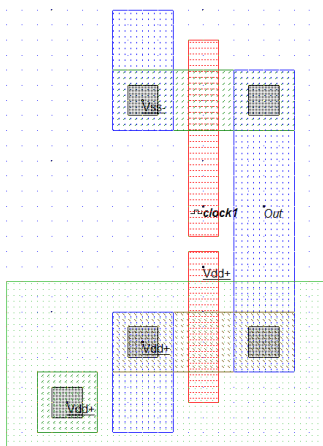


Рис. 5. Топология инвертора с ошибкой «константа 1»

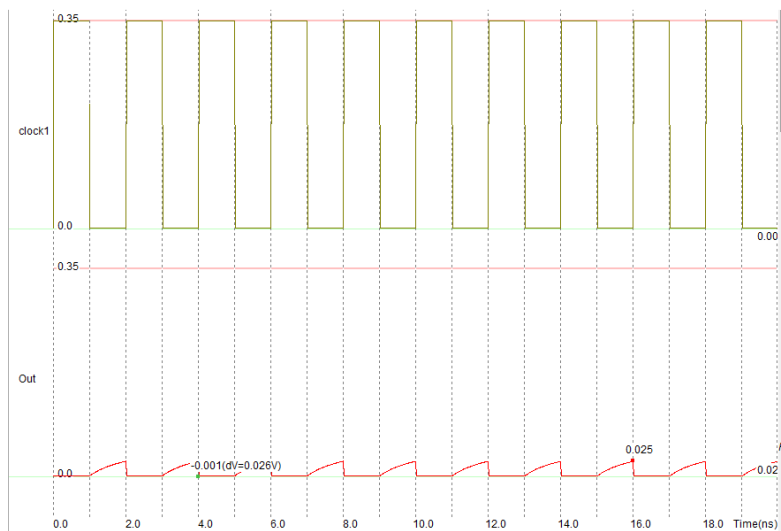


Рис. 6. Временная диаграмма топологии с ошибкой «константа 1»

Данная топология наглядно показывает уязвимость схемы такого плана: при неисправности одного элемента мы не сможем получить нужный нам сигнал.

Вероятность безотказной работы инвертора (два транзистора) для распределения Вейбулла

$$P(t)_i = e^{-2\lambda t^\alpha},$$

где λ – интенсивность отказов одного транзистора; t – время, α – коэффициент распределения Вейбулла.

Вероятность безотказной работы расчлененного инвертора считается по формуле

$$P(t)_{qi} = [e^{-4\lambda t^\alpha} + 4e^{-3\lambda t^\alpha} (1 - e^{-\lambda t^\alpha})].$$

По идее надо брать три инвертора и мажоритарный элемент, но мажоритарный элемент сам инвертирует, поэтому берем за расчетную формулу

$$P_{tmr} = 3e^{-2(n)\lambda t^\alpha} - 2e^{-3(n)\lambda t^\alpha}.$$

Сравниваем расчлененный инвертор со схемой мажоритары (рис. 7).

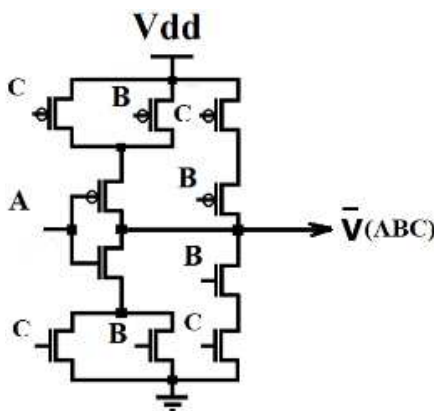


Рис. 7. Схема мажоритары

График вероятности безотказной работы при $\lambda = 10^{-5}$, $\alpha = 1,5$ представлен на рис. 8.

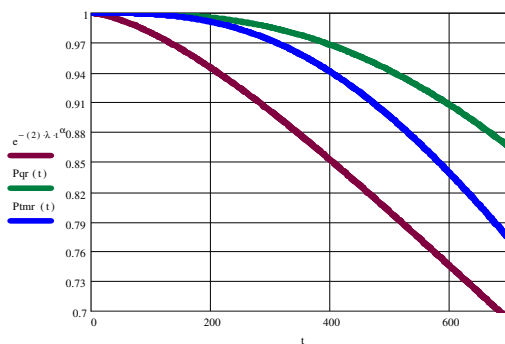


Рис. 8. График зависимости вероятности безотказной работы от времени

Чтобы повысить надежность схемы и гарантировать работу инвертора при отказе одного транзистора, усложним схему вводом еще нескольких транзисторов. Продублируем каждый транзистор три раза, чтобы в итоге получить два расчетверенных транзистора. Полученная топология отказоустойчивого инвертора представлена на рис. 9.

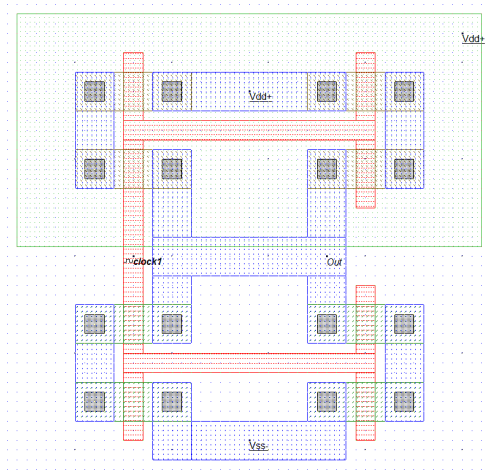


Рис. 9. Топология отказоустойчивого инвертора

Так, проверим работоспособность при напряжении питания 0,35 В и частоте 1,25 ГГц (временная диаграмма – на рис. 10) и том же напряжении и частоте 2,5 ГГц (временная диаграмма представлена на рис. 11).

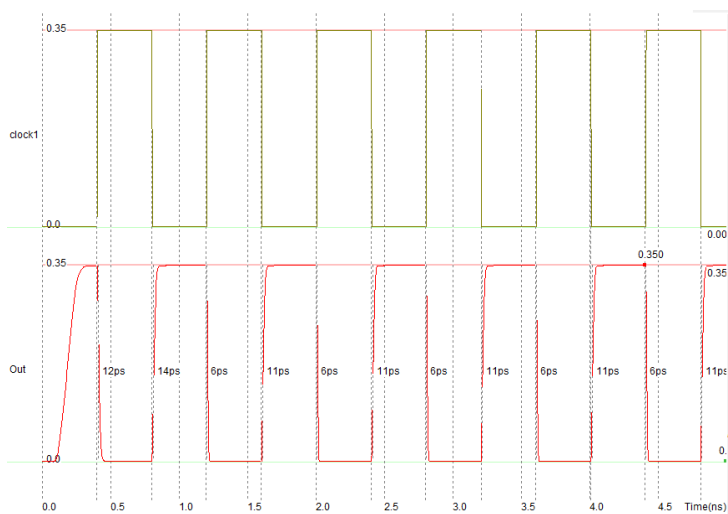


Рис. 10. Временная диаграмма «надежного» инвертора при частоте 1,25 ГГц

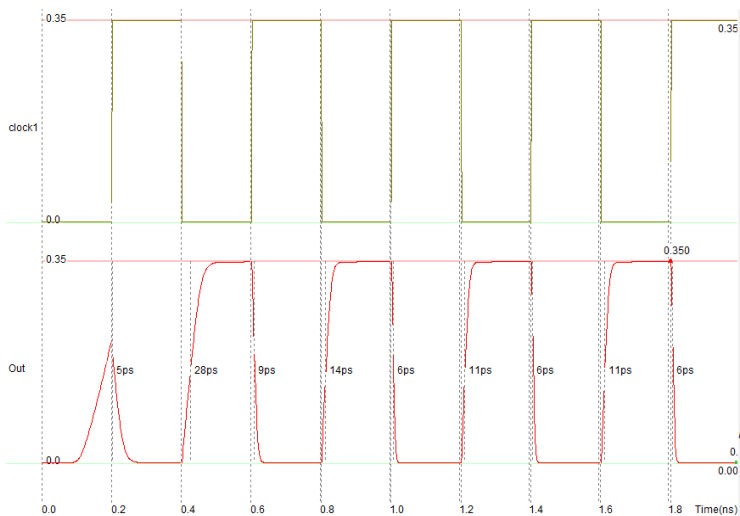


Рис. 11. Временная диаграмма «надежного» инвертора при частоте 2,5 ГГц

Чтобы убедиться в том, что данная топология обладает большей отказоустойчивостью, проверим ее работу в нескольких случаях отказов. Первый случай – отказ одного транзистора. Ошибка «константа 0» (рис. 12).

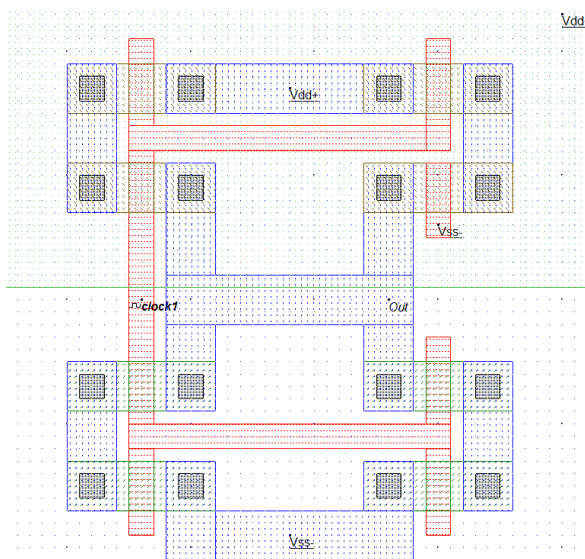


Рис. 12. Топология отказоустойчивого инвертора с одной ошибкой «константа 0»

Подадим сигнал с частотой 1,25 ГГц и напряжение питания 0,35 В. Временная диаграмма представлена на рис. 13.

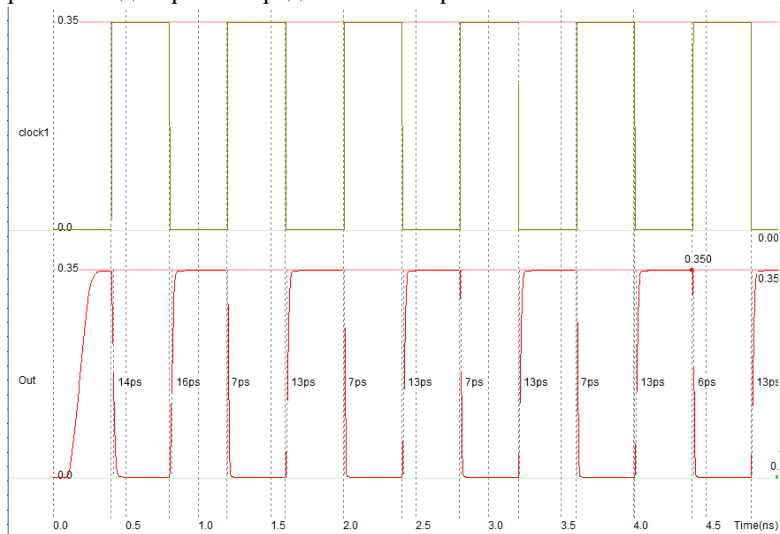


Рис. 13. Временная диаграмма «надежного» инвертора с ошибкой «константа 0»

Для реального использования данной топологии важна потребляемая мощность и быстродействие. Как можно увидеть на временных диаграммах выше, быстродействие у отказоустойчивого инвертора незначительно ниже, чем у обычного.

Для оценки энергопотребления рассмотрим графики зависимости потребляемой мощности от напряжения питания (рис. 14) и зависимости потребляемой мощности от частоты сигнала (рис. 15).

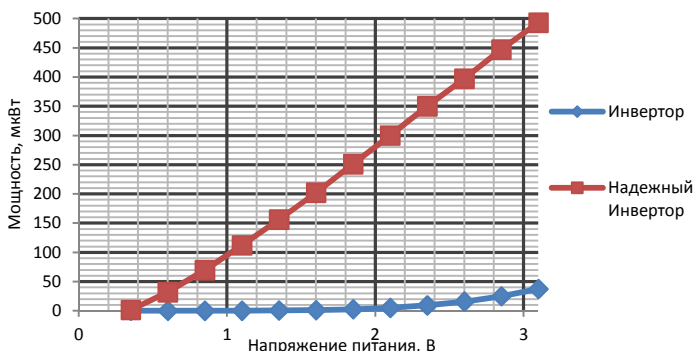


Рис. 14. График зависимости мощности от напряжения питания

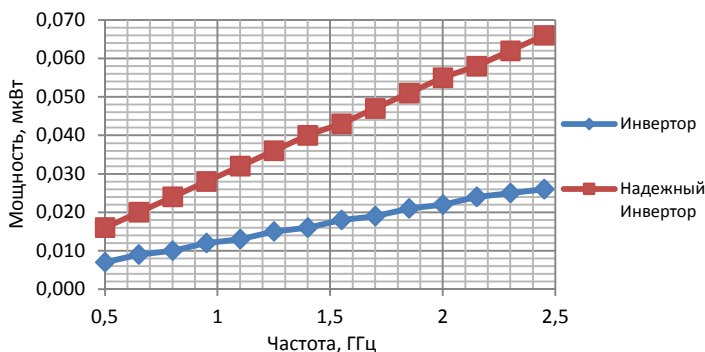


Рис. 15. График зависимости мощности от частоты сигнала

Как видно из графиков, потребляемая мощность у отказоустойчивого инвертора выше из-за большего числа элементов. При высоком напряжении питания потребление мощности значительно выше, а при повышении частоты сигнала потребление не так сильно отличается от обычного инвертора.

В статье представлена топология отказоустойчивого инвертора, способного работать с незначительными ухудшениями характеристик, но с большей надежностью. Данная топология может применяться, когда надежность важнее других характеристик.

Библиографический список

1. Проектирование интегральных схем / Б.Г. Коноплев, Е.А. Рындин, Н.К. Приступчик, М.А. Денисенко. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010. – 76 с.
2. Weibull W. A statistical distribution function of wide applicability // J. Appl. Mech.-Trans. ASME. – 1951. – Vol. 18(3). – P 293–297.
3. Grekov A.V., Tyurin S.F. Fault tolerant logic cell FPGA. Proceedings of the 2017 // IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, ElConRus 2017. – 2017. 7910548. – P. 287–290.
4. Тюрин С.Ф. Радиационно-устойчивая ячейка SRAM // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2014. – № 4(12). – С. 14–30.

Сведения об авторах

Никитин Максим Сергеевич – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КОБ-16-1с, г. Пермь, e-mail: mann1k@yandex.ru

Тюрин Сергей Феофентович – доктор технических наук, профессор, Заслуженный изобретатель Российской Федерации, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, профессор кафедры «Математическое обеспечение вычислительных систем» Пермского государственного национального исследовательского университета, г. Пермь, e-mail: tyurinsergfeo@yandex.ru

Е.К. Сермягина, В.М. Крынов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТИ ТОКА ДЛЯ КАБЕЛЬНЫХ И ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Рассматривается вопрос определения актуальных значений экономической плотности тока для воздушных и кабельных линий. Приведенные в ПУЭ нормативы экономической плотности тока были рассчитаны несколько десятилетий назад и в настоящий момент не в полной мере отвечают изменениям, произошедшим в экономике. Данная проблема является значимой, поскольку применение устаревших показателей может привести к неоптимальному выбору технико-экономических показателей сети.

Ключевые слова: экономическая плотность тока, выбор сечения, линии электропередачи.

E.K. Sermjagina, V.M. Krynov

DETERMINATION OF THE ECONOMIC CURRENT DENSITY FOR CABLE AND AIR LINES IN MODERN CONDITIONS

This article discusses the issue of determining the current values of economic current density for overhead and cable lines. The standards for economic current density given in the Rules for arrangement of electrical installation were calculated more than a few decades ago and currently do not meet modern conditions, because during this time significant changes have occurred in the economy.

Keywords: economic current density, selection of cross-section, power lines.

Экономическое обоснование выбора сечения проводов и кабелей обусловлено следующими зависимостями: при увеличении сечения уменьшаются потери электрической энергии и затраты на их оплату, но возрастает стоимость линии электропередачи (ЛЭП). Таким образом, сечение выбирается из расчета минимума потерь в течение периода эксплуатации и суммарных затрат на сооружение ЛЭП, что соответствует оптимальному экономическому сечению провода.

Согласно ПУЭ [1], экономическая плотность тока определяется исходя из нескольких величин: используемого металла проводника, вида изоляции, числа часов использования максимума нагрузки. Совершенствование методики выбора сечения проводников с технико-

экономическим обоснованием, учитывающей современные стоимостные показатели, описано в работах [2, 3]. Отмечая бесспорную ценность существующих исследований, стоит отметить, что в них рассчитываются единовременные капитальные вложения в строительство линии и затраты на эксплуатацию без учета фактора времени.

На основе анализа указанных выше работ была получена формула (1), с использованием которой предложено рассчитывать экономическую плотность тока для проводов и кабелей разных напряжений и типов изоляции. В данной формуле учитывается часть удельных капитальных затрат, пропорциональных сечению провода и зависящих от типа изоляции, стоимость электроэнергии согласно уровню напряжения, удельное сопротивление материала провода, пропорциональное сечению провода, и ставка дисконтирования:

$$3 = \gamma L F - \frac{\sum_{t=t_0}^{T_p} (3C_0 I^2 \tau \rho L) / F}{\sum_{t=t_0}^{T_p} (1 + E)^t}, \quad (1)$$

$$\frac{d3}{dF} = \gamma L - \frac{\sum_{t=t_0}^{T_p} 3C_0 I^2 \tau \rho L}{F^2 (1 + E)^t},$$

где γ – часть удельных капитальных затрат, пропорциональная сечению провода, руб/км·мм²; L – длина линии электропередачи, км; C_0 – стоимость электроэнергии в зависимости от напряжения, руб/кВт·ч; I – расчетный ток, А; τ – время наибольших потерь, ч; ρ – удельное сопротивление материала провода, пропорциональное сечению провода, Ом·мм²/м; F – сечение провода, мм²; E – ставка дисконтирования, равная норме прибыли на капитал, %.

В ходе преобразования была получена окончательная формула экономической плотности тока $j_{\text{ЭК}}$, А/мм² (2), используя которую можно более точно определить значение в зависимости от большего количества переменных:

$$\gamma L = \frac{\sum_{t=t_0}^{T_p} 3C_0 I^2 \tau \rho L}{F^2 (1 + E)^t},$$

$$F_{\text{ЭК}} = \sqrt{\frac{\sum_{t=t_0}^{T_p} 3C_0 I^2 \tau \rho L}{\gamma L (1 + E)^t}} = \sqrt{\frac{3\rho \sum_{t=t_0}^{T_p} C_0 I^2 \tau}{\gamma (1 + E)^t}},$$

$$j_{\text{ЭК}} = \frac{I}{F_{\text{ЭК}}} = \sqrt{\frac{I^2 \gamma (1 + E)^t}{3\rho \sum_{t=t_0}^{T_p} C_0 I^2 \tau}} = \sqrt{\frac{\gamma (1 + E)^t}{3\rho \sum_{t=t_0}^{T_p} C_0 \tau}}. \quad (2)$$

Ниже представлены экономические плотности тока для проводов воздушных и кабельных линий (ВЛ и КЛ) различного напряжения (рис. 1–5, табл. 1–5). Для расчетов использовались значения укрупненных нормативов цен типовых технологических решений объектов электроэнергетики [4], а также учтена стоимость потерь электрической энергии.

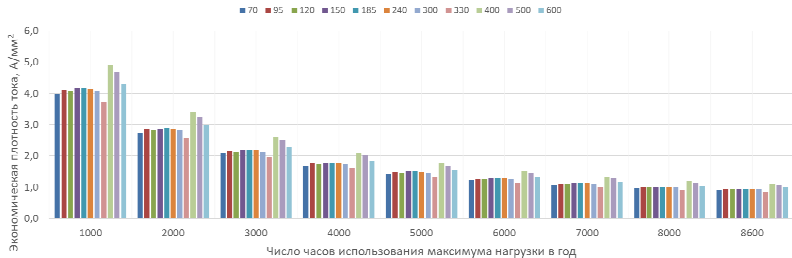


Рис. 1. Экономическая плотность тока для провода ВЛ сталеалюминиевого типа в зависимости от его сечения при напряжении 110 кВ

Анализируя полученные значения экономической плотности тока (ЭПТ) (см. рис. 1), можно сделать вывод, что в современных экономических условиях величина экономической плотности отличается от нормированной ПУЭ величины (см. табл. 1).

Таблица 1

Сравнение предложенных ЭПТ со значениями, нормируемыми в ПУЭ (для рис. 1)

$T_{\max}$	Более 1000 до 3000			Более 3000 до 5000		Более 5000			
$j_{\text{жк}}, \text{ПУЭ}$	1,3			1,1		1,0			
$T_{\max}$	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	8600
$j_{\text{жк}}, \text{расчет}$	4–5	3–3,5	2–2,5	1,8–2	1,5–1,7	1,3–1,5	1,1–1,3	1–1,1	0,9–1,1

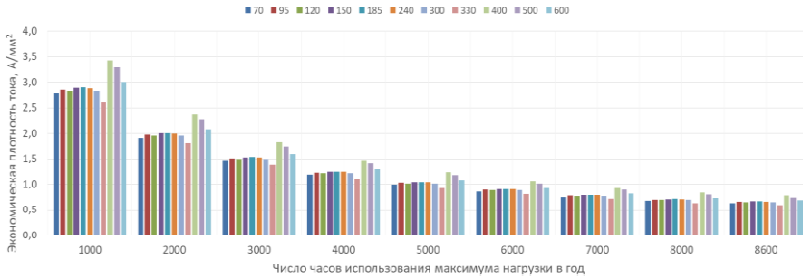


Рис. 2. Экономическая плотность тока для провода ВЛ сталеалюминиевого типа в зависимости от его сечения при напряжении 35 кВ

На основе сравнительного анализа для ВЛ на напряжение 35 и 110 кВ можно сделать вывод о зависимости ЭПТ от напряжения ЛЭП.

Таблица 2

Сравнение предложенных ЭПТ со значениями, нормируемыми в ПУЭ (для рис. 2)

$T_{\max}$	Более 1000 до 3000			Более 3000 до 5000		Более 5000			
$j_{\text{эк}} \text{ ПУЭ}$	1,3			1,1		1,0			
$T_{\max}$	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	8600
$j_{\text{эк}} \text{ расчет}$	2,8–3,4	2–2,3	1,5–1,8	1,2–1,5	1–1,2	0,9–1	0,8–0,9	0,7–0,8	0,6–0,7

Далее представлены экономические плотности тока для кабелей с изоляцией из разного материала на 10 кВ (см. рис. 3–5).

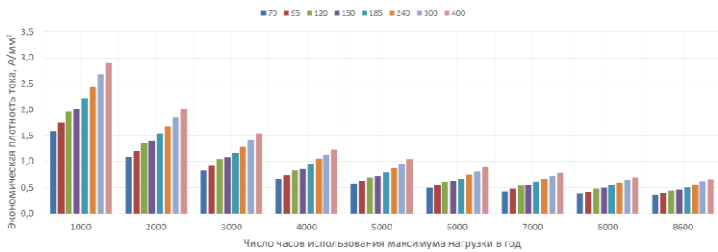


Рис. 3. Экономическая плотность тока для алюминиевого кабеля на напряжение 10 кВ с бумажной изоляцией в зависимости от его сечения

Из рис. 3–5 видно, что чем больше сечение кабеля, тем больше его пропускная способность с экономической точки зрения.

Таблица 3

Сравнение предложенных ЭПТ со значениями, нормируемыми в ПУЭ (для рис. 3)

$T_{\max}$	Более 1000 до 3000			Более 3000 до 5000		Более 5000			
$j_{\text{эк}} \text{ ПУЭ}$	1,6			1,4		1,2			
$T_{\max}$	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	8600
$j_{\text{эк}} \text{ расчет}$	1,6–2,9	1,1–2	0,8–1,5	0,7–1,2	0,6–1	0,5–0,9	0,4–0,8	0,4–0,7	

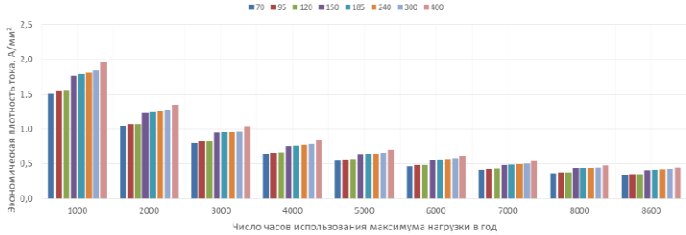


Рис. 4. Экономическая плотность тока для алюминиевого кабеля на напряжение 10 кВ с пластмассовой изоляцией в зависимости от его сечения

Таблица 4

Сравнение предложенных ЭПТ со значениями,
нормируемыми в ПУЭ (для рис. 4)

$T_{\max}$	Более 1000 до 3000			Более 3000 до 5000		Более 5000			
$j_{\text{жс}} \text{ ПУЭ}$	1,9			1,7		1,6			
$T_{\max}$	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	8600
$j_{\text{жс}} \text{ расчет}$	1,5–2	1–1,4	0,8–1	0,6–0,8	0,5–0,7	0,5–0,6	0,4–0,5	0,4–0,5	

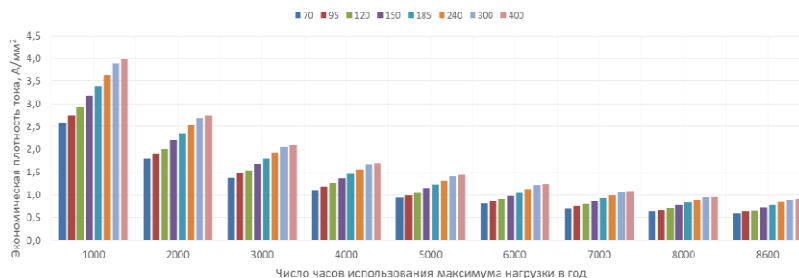


Рис. 5. Экономическая плотность тока для алюминиевого кабеля на напряжение 10 кВ с резиновой изоляцией в зависимости от его сечения

Таблица 5

Сравнение предложенных ЭПТ со значениями,
нормируемыми в ПУЭ (для рис. 5)

$T_{\max}$	Более 1000 до 3000			Более 3000 до 5000		Более 5000			
$j_{\text{жс}} \text{ ПУЭ}$	1,9			1,7		1,6			
$T_{\max}$	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	8600
$j_{\text{жс}} \text{ расчет}$	2,6–4	1,8–2,8	1,4–2,1	1,1–1,7	1–1,4	0,8–1,2	0,7–1,1	0,6–1	0,6–0,9

Анализируя полученные данные (см. табл. 1–5), можно сделать вывод об уменьшении экономической плотности тока при увеличении числа часов использования максимума нагрузки в год. Это подтверждает необходимость использования проводников большего сечения в целях сокращения потерь.

Для улучшения эффективности использования выбранного сечения значения экономической плотности тока должны быть более дифференцированы по числу часов использования максимума нагрузки. Также необходимо учитывать, что экономическая плотность тока зависит от напряжения, поскольку капитальные затраты на линии с различным напряжением имеют различные значения. Кроме того, на ЭПТ влияет стоимость потерь ЭЭ, разная в регионах

РФ. Все это обуславливает необходимость учета большего числа факторов при расчете экономически обоснованного сечения, что регламентируется существующими нормативными документами.

Библиографический список

1. Правила устройства электроустановок (ПУЭ) / Ростехнадзор. – 7-е изд. – М., 2010. – 411 с.

2. Ананичева С.С., Котова Е.Н. Проектирование электрических сетей. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2017. – 164 с.

3. Разработка модели для расчета экономической плотности тока в распределительных сетях в современных экономических условиях [Электронный ресурс]. – URL: https://dspace.susu.ru/xmlui/bitstream/handle/0001.74/12060/2016_368_kostinskijes.pdf?sequence=1 (дата обращения: 15.05.2019).

4. Об утверждении укрупненных нормативов цены типовых технологических решений капитального строительства объектов электроэнергетики в части объектов электросетевого хозяйства [Электронный ресурс]: приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 17.01.2019 г. № 10. – URL: <https://cdnimg.rg.ru/pril/165/41/01/53709.pdf> (дата обращения: 03.05.2019).

Сведения об авторах

Сермягина Екатерина Константиновна – студентка Оренбургского государственного университета, гр. 16ЭЭ(ба)Э-1, г. Оренбург, e-mail: sermyagina-ek@mail.ru

Крынов Владимир Михайлович – студент Оренбургского государственного университета, гр. 16ЭЭ(ба)Э-1, г. Оренбург, e-mail: Vovakrynov@rambler.ru

В.И. Горбунов, С.В. Ершов

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СШИВКИ ПОЛИЭТИЛЕНА МЕТОДОМ ДСК

В настоящее время кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена на высокое и среднее напряжение широко применяются для передачи электрической энергии к различным промышленным сооружениям и объектам городской инфраструктуры. Проведено экспериментальное исследование процесса сшивки полиэтилена на дифференциальном сканирующем калориметре. Эксперименты проводились в двух режимах нагрева измерительной ячейки прибора: первый в стандартном режиме с постоянной скоростью нагрева, второй – в режиме МДСК, т.е. в процессе нагрева производились модуляции по температуре. В результате были получены графики изменения общего, обратимого и необратимого тепловых потоков от температуры. Проведен сравнительный анализ двух методов и оценен тепловой эффект сшивки полиэтилена.

Ключевые слова: сшивка, полиэтилен, изоляция, дифференциальная сканирующая калориметрия, экспериментальное исследование.

V.I. Gorbunov, S.V. Ershov

THE INVESTIGATION OF POLYETHYLEN CROSSLINKING BY DSC METHOD

Currently, cables with insulation of cross-linked polyethylene for high and medium voltage are widely used for the transmission of electrical energy to various industrial facilities and urban infrastructure. In this work, an experimental study of the process of crosslinking polyethylene on a differential scanning calorimeter was carried out. The experiments were carried out in two heating modes of the measuring cell of the device: the first in the standard mode with a constant heating rate, the second in the MDSC mode, that is, the temperature was modulated during the heating process. As a result, graphs of changes in total, reversible and irreversible heat flux versus temperature were obtained. A comparative analysis of the two methods was carried out and the thermal effect of polyethylene crosslinking was evaluated.

Keywords: crosslinking, polyethylene, insulation, differential scanning calorimetry, experimental study.

Сшитый полиэтилен (СПЭ) нашел применение в различных сферах жизнедеятельности человека благодаря таким качествам, как высокая термостойкость и износостойкость, низкая стоимость в производстве, хорошая химическая и коррозионная стойкость, высокая диэлектрическая прочность [1]. В отличие от обычного полиэтилена

(ПЭ), сшитый полиэтилен обладает более высокой плотностью и прочностью, что позволяет СПЭ решать более серьезные задачи.

Самое широкое применение СПЭ получил в производстве кабельной продукции, в частности изоляции кабельных изделий, а также в автомобильной промышленности, медицине и других отраслях.

Существует три метода сшивки ПЭ: пероксидная, силановая, радиационная. Первые два являются химическими способами, т.е. к обычному полиэтилену добавляют сшивающий агент, последний способ осуществляется путем облучения обычного полиэтилена радиацией. При производстве кабелей на высокое и среднее напряжение используется пероксидная сшивка. Выбор данного способа обусловлен тем, что радиационный метод не позволяет получить качественную сшивку по всей толщине изоляции, а силановая сшивка происходит в присутствии воды, что в условиях эксплуатации кабелей на высоких напряжениях может привести к пробое и преждевременному выходу из строя изоляции [2]. Однако процесс изготовления кабелей с СПЭ-изоляцией является весьма дорогостоящим. Для минимизации затрат на подбор рационального технологического режима и достижения хорошего качества сшивки в настоящее время проводятся различные эмпирические и теоретические исследования [3]. Одним из методов экспериментального исследования данного процесса является дифференциальная сканирующая калориметрия.

ДСК состоит из двух ячеек (рис. 1): в одной (S) находится исследуемый образец, в другую, называемую ячейкой сравнения (R), помещают эталон, при этом для получения максимальной точности измерительная камера сконструирована максимально симметрично [4]. Между тиглем и термопарой находится теплопроводящая колонка, которая позволяет измерять усредненную температуру со всей площади тигля. Экспериментально измеряется временная зависимость разницы значений температуры между ячейкой с образцом и ячейкой сравнения.

Теплота в методе ДСК определяется через тепловой поток, производную теплоты по времени (отсюда термин «дифференциальный»). Тепловой поток измеряется как разница значений температуры в двух точках измерительной системы в один момент времени. Измерения можно проводить как в изотермических условиях, так и в динамическом режиме при программируемом изменении температуры печи (калориметры такого типа называют «сканирующими») [4]. На рис. 2 представлен прибор DSC Q2000 производства TA Instruments.

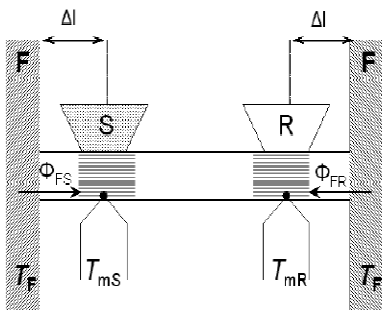


Рис. 1. Схема измерительной ячейки ДСК



Рис. 2. DSC Q2000

Метод модулированной дифференциальной сканирующей калориметрии является вариантом традиционной ДСК, в котором обычное линейное нагревание совмещено с модулированием температуры (рис. 3). Метод был впервые опубликован в 1992 г. Майклом Ридингом. Преимуществом МДСК является возможность разделить обратимые и необратимые тепловые эффекты [5].

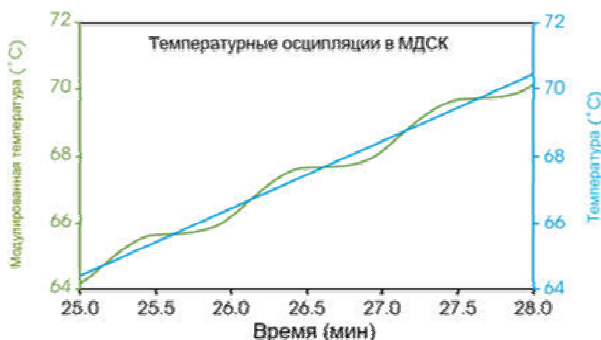


Рис. 3. Изменение температуры в режиме МДСК

Для исследования процесса пероксидной сшивки полиэтилена использовался DSC Q2000. Сначала были проведены измерения теплового потока в режиме стандартного ДСК, затем в модулированном. Нагрев исследуемых образцов производился от комнатной температуры до 240 °С, со скоростью 10 °С/мин в атмосфере азота. После первого нагрева образец охлаждался с той же скоростью, затем снова

нагревался, для того чтобы определить степень сшивки. На рис. 4 приведены кривые зависимости теплового потока, полученные в ходе первого и второго нагрева методом стандартной ДСК.

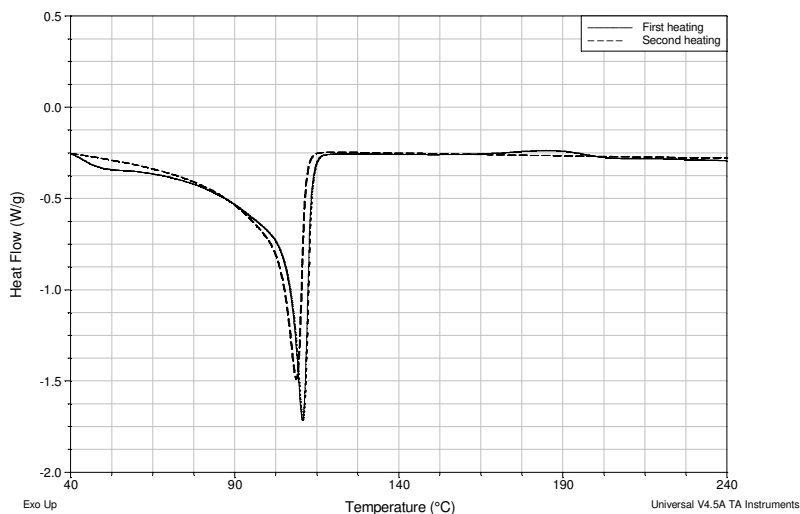


Рис. 4. Кривые теплового потока, полученные методом ДСК

Из полученных кривых видно, что плавление материала происходит в диапазоне температур от 100 до 110 °С. Затем, при достижении температуры 165 °С, начинается экзотермическая реакция, сопровождающаяся выделением тепла, что свидетельствует о начале процесса сшивки полиэтилена. Окончательно процесс заканчивается при достижении температуры 200 °С. При повторном нагреве кривая теплового потока в данной области изменяется линейно, что позволяет говорить об окончательном завершении процесса сшивки при первом нагреве.

Для того чтобы более подробно рассмотреть все реакции, происходящие с исследуемым материалом при нагреве, был проведен аналогичный эксперимент в режиме модулированной дифференциальной сканирующей калориметрии. На рис. 5 представлены кривые общего, обратимого и необратимого тепловых потоков.

Анализируя полученные графики, можно отметить, что в области плавления полиэтилена значительные изменения наблюдаются как на кривой обратимого, так и на кривой необратимого теплового потока. Данный эффект говорит о том, что при плавлении происходит улучшение кристаллической структуры полимера. Поскольку оба

процесса протекают практически одновременно, на кривой, полученной стандартным методом ДСК, они неразличимы. В области, где происходит сшивка полиэтилена, существенные изменения наблюдаются только на кривой необратимого теплового потока, анализируя которую можно определить теплоту реакции сшивки.

Подводя итог, можно сделать ряд выводов. Использование метода модулированного ДСК позволяет более полно рассмотреть все реакции, протекающие при нагреве в материале, и разделить их на обратимые и необратимые. Кроме этого, полученные в результате анализа экспериментальных данных значения выделяемой теплоты реакции сшивки могут быть использованы при моделировании данного процесса, что позволит подобрать рациональный режим наложения изоляции на токопроводящую жилу при производстве и тем самым снизить затраты на натурные эксперименты.

Библиографический список

1. Жутяев А.С. Развитие технологий полиолефинов для кабельного производства. Мировые тенденции и новые материалы // Кабели и Провода. – 2016. – С. 23–26.
2. Савватеев Д.А., Яковкина Т.Н. Особенности образования триингов в изоляции сшитого полиэтилена // Тр. Брат. гос. ун-та. Естественные и инженерные науки. – 2016. – С. 30–32.
3. Vanja Kosar, Zoran Gomzi, Krešimir Šintić. Chemical engineering and processing: process intensification // Modelling and Simulation of the Continuous Power Cable Processing. – 2007. – P. 83–88.
4. Емелина А.Л. Дифференциальная сканирующая калориметрия. – М.: Лаборатория химического факультета МГУ, 2009. – 43 с.
5. Robert L. Danley. New modulated DSC measurement technique // Thermochimica Acta. – 2003. – Vol. 402. – P. 91–98.

Сведения об авторах

Горбунов Владислав Игоревич – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: vladgorbunov@bk.ru

Ершов Сергей Викторович – ассистент кафедры «Конструирование и технологии в электротехнике» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: ershov_sv@bk.ru

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

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТАЦИОНАРНОГО РЕЖИМА
РАБОТЫ ГРЕЮЩЕГО КАБЕЛЯ, ПРОЛОЖЕННОГО
ВНУТРИ ВОДОПРОВОДА**

Рассмотрена математическая модель процессов конвективного теплообмена в водопроводной трубе, проложенной в земле, внутри которой располагается греющий кабель. Построена стационарная двумерная математическая модель процессов тепломассопереноса, реализация которой осуществлена методом конечных объемов в инженерном пакете ANSYS. Приведены зависимости средней температуры жилы греющего кабеля и максимальной температуры воды от различных факторов.

Ключевые слова: стационарная математическая модель, греющий кабель, излучение, тепломассоперенос.

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

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

This article describes a mathematical model of convective heat transfer processes in the underground water pipe, inside which is located the heating cable. A stationary two-dimensional mathematical model of heat and mass transfer processes was constructed, the implementation of which was carried out by the finite volume method in the engineering software ANSYS. The dependences of the average temperature of the heating cable core and the maximum water temperature on various factors are presented in this article.

Keywords: stationary mathematical model, convection, heating cable, heat and mass transfer.

На практике существует проблема сохранения постоянной температуры трубопроводов с жидкими веществами, особенно в зимнее время года. Для поддержания заданной температуры среды прибегают к различным способам обогрева трубы. Наиболее распространенным способом является обогрев греющим кабелем, эффективность которого зависит от ряда факторов: конструкция кабеля, приложенная мощность, характеристика обогреваемого объекта, температура окружающей среды и т.д.

В современной научной литературе можно выделить ряд статей, в которых рассматривается анализ тепловых процессов при использовании греющего кабеля. В статье [1] рассматривается моделирование температурного поля в нефтяной скважине с греющим кабелем. Авторами работы [2] описано применение теплового расчета в нефтепроводе, оснащенного системой электроподогрева. Математическое моделирование обогрева систем водоснабжения и водоотведения в суровых условиях описывается в материале работ [3, 4]. В источнике [5] приведено решение задачи тепломассопереноса при прокладке кабеля в здании.

Для оценки влияния различных факторов на эффективность работы кабеля была создана математическая модель греющего кабеля с элементами окружающей среды. Схематичное изображение рассматриваемых объектов приведено на рис. 1.

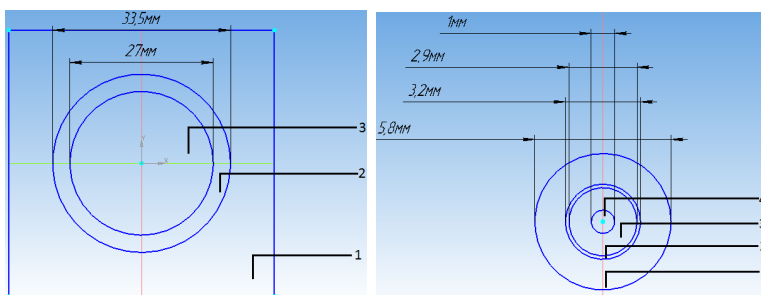


Рис. 1. Изолированная труба с геометрическими размерами (а): 1 – земля; 2 – стенка трубы; 3 – вода; рассматриваемый нагревательный кабель (б): 1 – изоляция по экрану; 2 – экран; 3 – изоляция по жиле; 4 – жила

Для решения задачи были сделаны допущения: задача стационарная, плоская, теплофизические свойства твердых материалов постоянны. С учетом сделанных допущений система дифференциальных уравнений выглядит следующим образом:

– уравнение энергии для элементов системы:

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

– уравнение энергии для жилы греющего кабеля:

$$\lambda_{ж} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + q_v = 0, \quad (2)$$

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·°C; λ_4 – коэффициент теплопроводности изоляции по экрану, Вт/м·°C; λ_5 – коэффициент теплопроводности экрана, Вт/м·°C; λ_6 – коэффициент теплопроводности изоляции по жиле, Вт/м·°C; $\lambda_{ж}$ – коэффициент теплопроводности жилы греющего кабеля, Вт/м·°C; x, y – декартовы координаты; T – температура, °C.

Граничные условия:

Система дифференциальных уравнений дополняется условиями однозначности:

- на верхней границе области исследования задавалась температура от 0 до -27 °C и коэффициент теплоотдачи $\alpha = 10$ Вт/м²·°C;
- 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 рис. 2–4 представлены графики изменения температуры воды в трубе и температуры жилы греющего кабеля в зависимости от числа итераций при разных значениях температуры на границе области исследования.

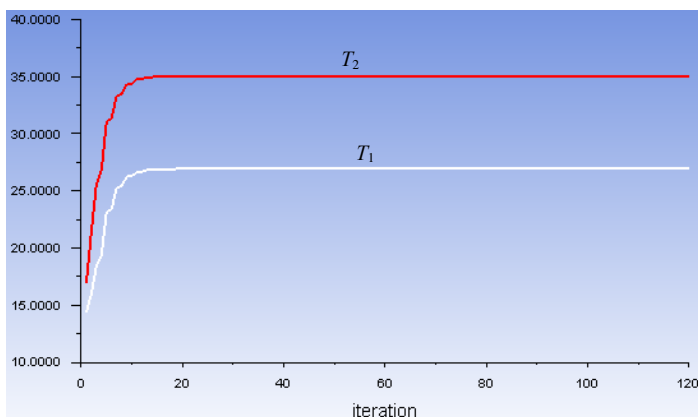


Рис. 2. Зависимость температуры воды и температуры жилы от числа итераций при температуре на границе области исследования 0 °C: T_1 – максимальная температура воды; T_2 – средняя температура жилы

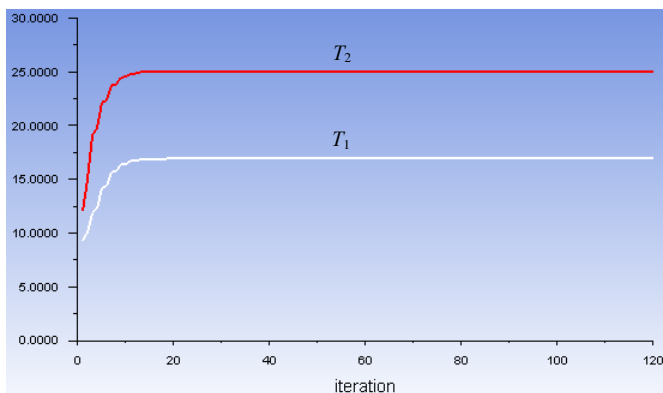


Рис. 3. Зависимость температуры воды и температуры жилы от числа итераций при температуре на границе области исследования $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$: T_1 – максимальная температура воды; T_2 – средняя температура жилы

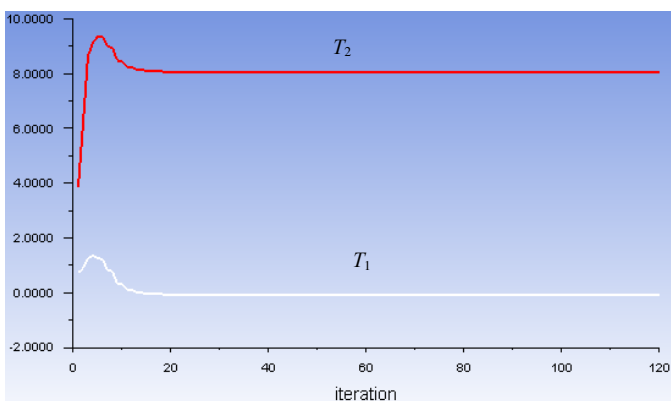


Рис. 4. Зависимость температуры воды и температуры жилы от числа итераций при температуре на границе области исследования $-27\text{ }^{\circ}\text{C}$: T_1 – максимальная температура воды; T_2 – средняя температура жилы

В результате численного решения поставленной задачи получены поля температур в греющем кабеле и в трубопроводе с водой. Исследовано влияние температуры поверхности Земли на температуру воды в трубе и на температуру жилы греющего кабеля.

Из рис. 1–4 видно, что при уменьшении температуры на поверхности Земли температура воды в водопроводе и температура жилы уменьшаются.

На рис. 5 представлены зависимости температуры воды в трубе и температуры жилы от температуры на поверхности Земли.

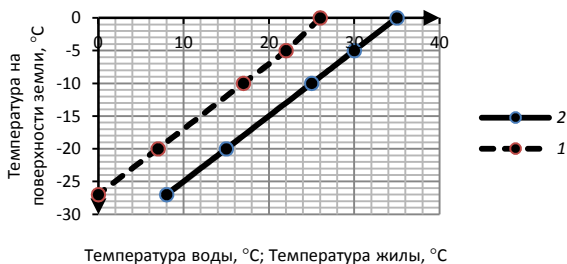


Рис. 5. График зависимости температуры воды в трубе и жилы греющего кабеля от температуры на поверхности Земли: 1 – зависимость максимальной температуры воды в трубопроводе от температуры на поверхности Земли; 2 – зависимость средней температуры жилы греющего кабеля от температуры на поверхности Земли

Влияние мощности греющего кабеля на температуру воды и температуру жилы приведено на рис. 6. Рассматривались три варианта мощности: 5, 10 и 20 Вт/м². Температура воды и нагревательной матрицы имеет линейную зависимость от мощности нагревательной жилы.

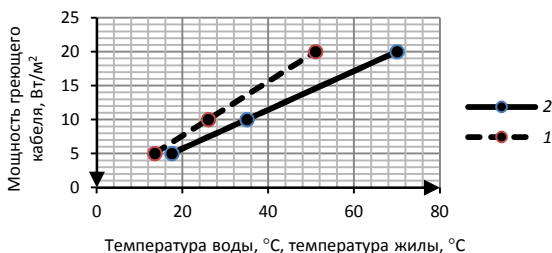


Рис. 6. Зависимость мощности греющего кабеля от температуры воды в трубе и температуры жилы греющего кабеля: 1 – зависимость мощности греющего кабеля от максимальной температуры воды в трубопроводе; 2 – зависимость мощности греющего кабеля от средней температуры жилы

Таким образом, результаты, полученные в ходе численных экспериментов, позволяют сделать следующие выводы:

1. Температуры воды в трубе и жилы греющего кабеля прямо пропорциональны температуре на поверхности Земли, зависимость носит линейный характер.

2. С увеличением мощности греющего кабеля вода в трубе прогревается эффективнее.

3. При использовании греющего кабеля мощностью 10 Вт/м^2 , при температуре на поверхности Земли -27°C , температура воды устанавливается 0°C . Для более низких значений температуры на поверхности Земли необходимо подбирать кабель более высокой мощности.

Библиографический список

1. Кухарчук И.Б., Ковригин Л.А. Моделирование температурного поля в нефтяной скважине с греющим кабелем // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2011. – № 5. – С. 14–18.

2. Крапивский Е.И., Вишняков И.А. Об особенностях эксплуатации трубопровода, оснащенного системой электроподогрева // ГИАБ. – 2012. – № 7. – С. 319–322.

3. Геселько А.М., Ушакова И.Г. Проектирование систем водоснабжения и водоотведения в суровых климатических условиях Сибири // Вестник ОмГАУ. – 2015. – № 4(20). – С. 71–77.

4. Труфанова Н.М., Будаян В.А. Нестационарная задача тепло-массопереноса при прокладке кабеля в зданиях и сооружениях // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2017. – № 23. – С. 5–16.

Сведения об авторах

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

Дятлов Илья Яковлевич – учебный мастер 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

А.И. Кабирова, А.Г. Щербинин

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА
ЛИНЕЙНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО РАСШИРЕНИЯ
АРАМИДНЫХ НИТЕЙ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ САМОНЕСУЩЕГО КАБЕЛЯ**

Рассмотрены проблемы конструирования оптических самонесущих кабелей, основанные на арамидных нитях. Проведено исследование влияния коэффициента линейного термического расширения арамидных нитей на коэффициент затухания готового изделия и, соответственно, на эксплуатационные характеристики самонесущего кабеля.

Ключевые слова: оптическое волокно, испытания, оптический самонесущий кабель, арамидные нити.

A.I. Kabirova, A.G. Shcherbinin

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF THE COEFFICIENT
OF THE LINEAR THERMAL EXPANSION OF ARAMID
THREADS TO OPERATIONAL CHARACTERISTICS
SELF-PROPELLED CABLE**

This article discusses the problems of designing self-supporting optical cables based on aramid yarns. A study was made of the influence of the linear thermal expansion coefficient of aramid yarns on the attenuation coefficient of the finished product and, accordingly, on the performance characteristics of a self-supporting cable.

Keywords: optical fiber, testing, optical self-supporting cable, aramid yarn.

В настоящее время самым распространенным способом строительства магистральных сетей волоконно-оптических линий связи является подвес волоконно-оптических кабелей по существующим опорам к линиям электропередач. Данный способ оправдан по причине высокой скорости строительства линии и не требует применения большого количества специальной техники. Правильно подобранный и смонтированный кабель обеспечит стабильную передачу сигнала в течение всего срока эксплуатации.

На рис. 1 представлен стандартный подвесной самонесущий кабель ДПТ-48У (6×8) – 85 кН, у которого 6 оптических модулей, в каждом по 8 одномодовых оптических волокон с низкими потерями

и улучшенной стойкостью к изгибам. В маркировке 85 кН – максимально допустимая растягивающая нагрузка (МДРН). В центре кабеля находится центральный силовой элемент (1) – стеклопластиковый пруток, вокруг которого скручены модули из полибутилентерефталата (3) с оптическим волокном (2), заполненные гидрофобным гелем. На скрутку модулей наложена промежуточная оболочка из полимерного материала (5), под которую под давлением закачан гидрофобный гель (4). На промежуточную оболочку накладываются арамидные нити (6), которые служат основным силовым элементом кабеля, обеспечивающим необходимую нагрузку на растяжение. Поверх нитей наружная оболочка из полимерного материала (7).

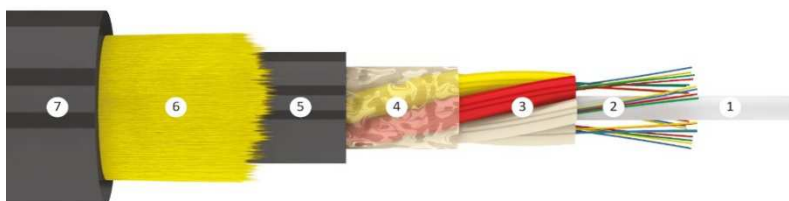


Рис. 1. Конструкция самонесущего кабеля

Применение подвесных оптических кабелей позволяет существенно удешевить и ускорить прокладку линии связи. В России с ее огромными территориями и холодным климатом спрос на подвесные оптические кабели будет сохраняться и следовать за ростом трафика. Арамидные нити являются одним из ключевых элементов в производстве таких кабелей.

Арамидные волокна представляют собой высокофункциональные химические соединения с характерными жесткими цепочками полимера. Их молекулы удерживаются сильными водородными связями, которые позволяют эффективно передавать механические нагрузки. Арамидные волокна не горят и не плавятся. Прочность у них выше прочности стали, а вес меньше. В условиях высоких температур сохраняют свои защитные свойства, а при отрицательных значениях даже усиливают.

Рассмотрены две конструкции самонесущего кабеля, геометрические параметры которых приведены в табл. 1. Первая конструкция стандартная, а вторая – с увеличенным оптическим модулем.

Таблица 1

Геометрические параметры конструкций

Параметр	Стандартная конструкция	Увеличенная конструкция
Количество оптических волокон в кабеле, шт.	48 (6 оптических модулей по 8 оптических волокон)	
Диаметр центрального силового элемента (ЦСЭ), мм	2,8	3,0
Диаметр модуля (внутренний / внешний), мм	2,1 / 2,8	2,3 / 3,0
Диаметр по скрутке, мм	8,4	9,0
Толщина промежуточной оболочки, мм	0,7	0,7
Диаметр промежуточной оболочки, мм	9,8	10,4
Количество арамидных нити (линейной плотность 1580 dtex), шт.	916	908
Диаметр по нитям, мм	14,9	15,3
Толщина оболочки, мм	2,0	2,0
Внешний диаметр кабеля, мм	18,9	19,3

В табл. 2 представлены механические характеристики материалов, используемых в кабелях. Из таблицы можно увидеть, что коэффициент линейного температурного расширения арамидных нитей имеет наименьшее значение.

Таблица 2

Механические характеристики материалов

Материал	E – модуль упругости, кН/мм ²	α – коэффициент линейного температурного расширения (КЛТР), 1/С
Стеклопластик	50	0,000 006
Арамидные нити	100	–0,000 003
Полиэтилен	0,35	0,0002
Полибутилентерефталат	1,6	0,000 15

При растяжении кабеля необходимо учитывать его модуль упругости. Оптический кабель состоит из различных материалов, при этом определяющее значение на модуль упругости целого кабеля в данной конструкции оказывают центральный силовой элемент и упрочняющие нити. При расчете максимально допустимой растягивающей нагрузки рассматриваются оптические кабели со свободной укладкой волокна в оптических модулях, скрученных вокруг центрального силового элемента (ЦСЭ).

Максимально допустимая растягивающая нагрузка пропорциональна предельно допустимому удлинению самого кабеля и оптического волокна.

Удлинение кабеля приводит вначале к «раскручиванию» элементов скрутки и распрямлению оптических модулей, а впоследствии к тому, что волокна, расположенные в центре модуля, начинают смещаться к внутренней поверхности модуля у ЦСЭ (рис. 2). При этом удлинения волокна еще не происходит.

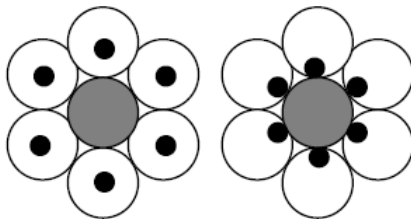


Рис. 2. Расположение волокон в оптическом модуле самонесущего кабеля

При дальнейшем удлинении кабеля волокно распрямляется за счет избыточной длины в модуле, после чего начинает удлиняться и достигать некоторого предельного значения, превышение которого приводит к росту затухания волокна. Ввиду этого допустимое удлинение кабеля необходимо учитывать при расчете максимально допустимой растягивающей нагрузки.

Максимально допустимое удлинение оптического волокна определяется исходя из зависимости срока службы оптического волокна от приложенной растягивающей нагрузки. При определенном сроке службы кабеля в 25 лет допускается удлинение волокна на величину до 0,2 % без ухудшения его свойств в течение всего времени¹.

Допустимое удлинение кабеля, при котором волокно не подвергается механическому напряжению, зависит от конструкции, определяемой конкретным изготовителем.

Путем увеличения радиуса скрутки и зазора (внутреннего пространства модуля), а также уменьшения шага скрутки можно получить большее допустимое удлинение кабеля без превышения допустимого

¹ Инкаб. Завод по производству оптического кабеля [Электронный ресурс]. URL: <https://incab.ru/useful-information> (дата обращения: 25.02.2019).

механического напряжения волокна. При этом шаг скрутки не должен быть меньше заданной величины, определяемой минимальным радиусом кривизны волокна за счет спиральной скрутки модулей.

Результаты испытаний самонесущих кабелей на стойкость к воздействию растягивающей нагрузки приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты испытаний на растяжение самонесущего кабеля

Растягивающая нагрузка, кН	Удлинение оптического кабеля, %		Прирост затухания, дБ	
	Стандартная конструкция	Увеличенная конструкция	Стандартная конструкция	Увеличенная конструкция
0	0,00	0,00	–	–
7	0,04	0,02	0,03	0,02
16	0,18	0,17	0,04	0,03
25	0,27	0,23	0,03	0,02
33	0,36	0,30	0,01	0,00
42	0,45	0,42	0,00	0,02
51	0,55	0,51	0,01	0,03
59	0,64	0,60	0,01	0,02
67	0,72	0,69	0,04	0,01
76	0,82	0,79	0,01	0,04
85 (МДРН)	0,90	0,85	0,03	0,02

Испытания проведены по ГОСТ Р МЭК 794-1-93, метод F1², ТУ 3587-001-88083123–2010, п.п. 2.5.1–2.5.4³. Длина образца кабеля составляла 1000 м. Все оптические волокна кабеля соединялись в шлейф, длина которого равнялась 12 832 м.

Образец оптического кабеля на барабане помещался в климатическую камеру при нормальных климатических условиях. Два конца были выведены из климатической камеры через специальное отверстие и разделаны соответствующим образом. При нормальных климатических условиях было измерено затухание шлейфа оптических волокон на длине волны 1550 нм. Далее температура в климатической камере понижалась до –60 °С, при которой кабель выдерживался 8 ч. После этого температура в климатической камере повышалась до +70 °С, при которой кабель также выдерживался 8 ч. Далее снова

² ГОСТ Р МЭК 794-1-93. Кабели оптические. Общие технические требования.

³ ТУ 3587-001-88083123–2010. Кабели связи оптические.

температура понижалась до -60°C с восьмичасовой выдержкой. В конце каждой выдержки проводилось измерение затухания шлейфа ОВ на длине волны 1550 нм. После этого температура повышалась до нормальных климатических условий и снова проводилось измерение затухания шлейфа ОВ. Кабель считается выдержавшим испытание:

– если в процессе испытаний прирост затухания ОВ в шлейфе на длине волны 1550 нм составит не более 0,05 дБ/км от первоначальных показателей;

– отсутствуют видимые механические повреждения кабеля.

Результаты этих испытаний приведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты испытаний на стойкость к климатическим
воздействиям самонесущих кабелей

t, °C	Время выдержки, ч	Затухание, дБ/км		Прирост затухания, дБ/км	
		Стандартная конструкция	Увеличенная конструкция	Стандартная конструкция	Увеличенная конструкция
+20	–	0,19	0,20	–	–
–50	3	0,19	0,20	0,01	0,00
–60	1	0,19	0,20	0,00	0,00
–60	8	0,20	0,21	0,02	0,01
+70	8	0,18	0,21	0,00	0,01
–40	3	0,19	0,20	0,00	0,00
–50	3	0,20	0,20	0,02	0,00
–60	1	0,26	0,20	0,07	0,00
–60	8	0,26	0,20	0,08	0,00
–60	12	0,26	0,20	0,07	0,00
+20	2	0,19	0,20	0,01	0,00

Из табл. 4 видно, что стандартная конструкция оптического самонесущего кабеля не прошла испытания по ТУ 3587-001-88083123–2010, п.п. 2.5.1–2.5.4 на стойкость к воздействию пониженной, повышенной температур и циклической смене температур, а увеличенная конструкция оптического самонесущего кабеля прошла.

Исходя из результатов испытаний однотипной конструкции с меньшей растягивающей нагрузкой (меньшее количество используемого арамида) было выявлено, что количество арамидных нитей, используемых в конструкции с растягивающей нагрузкой 85 кН, превысило максимально допустимое значение для данного типа конструкции и это привело к механическому воздействию на сердечник

кабеля при максимальных отрицательных значениях температуры во время климатических испытаний, а именно к сжатию оптических модулей и, как следствие, приросту затухания в оптических волокнах, превышающему нормативное значение (не более 0,05 дБ/км).

Было принято решение об увеличении размера сердечника на конструкциях с растягивающей нагрузкой более 80 кН, а именно увеличении внутреннего пространства оптического модуля, с целью снижения влияния механического воздействия арамидных нитей на оптические характеристики кабеля. Данное решение позволило положительно пройти климатические испытания, так как увеличение внутреннего пространства оптического модуля уменьшает риск механического воздействия на оптическое волокно при механическом сжатии сердечника кабеля.

Сведения об авторах

Кабирова Алина Илдаровна – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КТЭ-17-1м, г. Пермь, e-mail: alina.linchik@mail.ru

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

А.И. Судаков, И.А. Каменских, Д.В. Фалалеев

СНИЖЕНИЕ ТРУДОЕМКОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИДЕНТИФИКАЦИИ ПЕРЕХОДНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ В ЗАШУМЛЕННЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССАХ СИНХРОННЫХ МАШИН

Представлен эффективный подход к снижению трудоемкости исследования и идентификации переходной составляющей, присутствующей на всем протяжении зашумленных переходных процессов синхронных машин. Результат достигнут благодаря использованию обнаруженного ядра эффективных точечных выборок в области нижней границы зашумленного переходного процесса с одной переходной составляющей. При этом эффективно снижается объем обрабатываемой информации. Представлена оригинальная оценка ударного тока по опытным данным испытания синхронной машины мощностью 800 кВт при разных уровнях напряжения испытания.

Ключевые слова: синхронная машина, переходные процессы, идентификация, вариационные ряды, коэффициент вариации, математическое ожидание, дисперсия, случайный признак, постоянная времени, эффективные постоянные времени.

A.I. Sudakov, I.A. Kamenskikh, D.V. Falaleev

REDUCED EMPLOYMENT OF RESEARCH AND IDENTIFICATION OF THE TRANSITION COMPONENT IN NOISY TRANSIENT PROCESSES OF SYNCHRONOUS MACHINES

The report presents an effective approach to reducing the complexity of research and identification of the transition component that is present throughout the noisy transients of synchronous machines. The result was achieved due to the use of the detected core of effective point samples in the lower boundary of the noisy transient process with one transitional component. At the same time, the amount of information processed is effectively reduced. An original estimate of the impact current based on the experimental data of testing a 800 kW synchronous machine at different voltage levels of the test is presented.

Keywords: synchronous machine, transients, identification, variation series, the coefficient of variation, expected value, dispersion, random sign, time constant, effective time constants.

Работы [1–3] буквально изменяют традиционные взгляды на исследования и идентификацию переходных процессов (ПП) синхронных машин (СМ) в опытах внезапного короткого замыкания (ВКЗ), так как найдены эффективные пути снижения трудоемкости идентификации зашумленной переходной составляющей с открытием ядра эффективных точечных выборок (ЭТВ) в ПП, получены предельные оценки уровней коэффициентов вариации, дисперсии случайного признака в зашумленных вариационных рядах (отсутствующих в настоящее время в публикациях с использованием элементов теории вероятностей и математической статистики (ТВиМС)), раскрыта особая важность начального сдвига во времени ΔT вершин для точной оценки ударного тока и т.д. Апробация новейшего развития вероятностно-статистических методов (ВСМ) осуществлена по результатам стендовых испытаний синхронного турбодвигателя СТД-800-2 мощностью 800 кВт в опыте ВКЗ при уровнях напряжения испытания 0,25; 0,5; 0,75; 1,05 от номинального напряжения 6 кВ (рисунок, *а, б, в, г*). На рисунке, *д* приведены выборочно для одной из фаз дискретные огибающие ПП в виде вершин с шагом 0,02 с по исходным данным завода (в столбцах 1, 2 табл. 1), а на рисунке, *е* – полученные по выражениям (1) [1] дискретные огибающие в виде элементов ПП с шагом 0,01 с вместе с асимметричной составляющей полного тока якоря, полученной по методике стандарта (в столбце 7 табл. 1). Аналогичные результаты получены в фазах для всех уровней напряжения испытания.

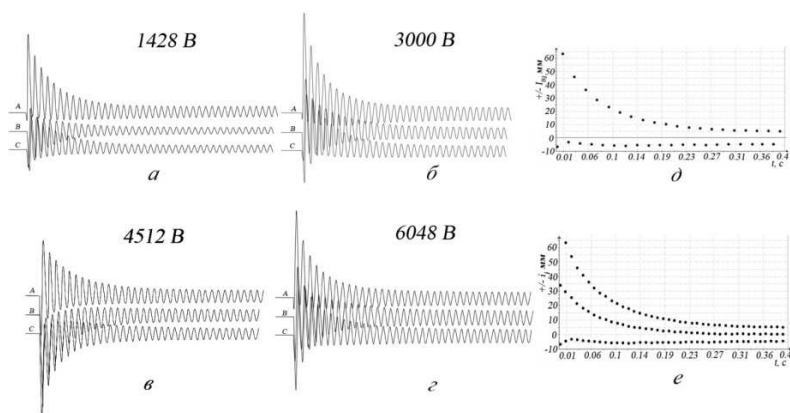


Рис. Переходные процессы в опытах ВКЗ: *а* – при напряжении статора 1428 В; *б* – 3000 В; *в* – 4512 В; *г* – 6048 В; огибающие ПП: *д* – в виде вершин с шагом 0,02 с; *е* – в виде элементов ПП с шагом 0,01 с совместно с асимметричной составляющей

Таблица 1

Исходные данные и промежуточные расчеты
для ф. А, $U_{\text{ст}} = 1428 \text{ кВ}$, $i_{\text{уст}} = 9 \text{ мм}$

$\Delta t_j, \text{с}$	$\pm I_{\text{в}j}, \text{мм}$	$i_{\text{и}j}, \text{мм}$	$i_{0j}, \text{мм}$	$i'_{0j}, \text{мм}$	$i''_{0j}, \text{мм}$	$i_{\text{а}j}, \text{мм}$	Модель процессов		Границы ЭТВ
							ВСМ	ГАМ	
0,01	63,10	2,812	65,91		9,097	30,14	65,92	67,35	$t_{\text{и}}, t_{\text{ан}}$
0,02	-3,30	53,65	56,95		5,135	25,17	56,52	57,92	
0,03	46,00	3,762	49,76		2,433	21,11	49,76	50,99	$t_{\text{в}}^{\wedge}$
...	...	...	...		...	...	...	...	
0,08	-5,60	26,01	31,61		0,571	10,20	31,13	32,06	$t_{\text{ав}}$
0,09	23,50	5,775	29,27		0,542	8,86	28,78	29,70	
0,10	-5,90	21,28	27,18	18,18	0,588		26,69	27,60	$t_{\text{и1}}$
0,11	19,30	5,988	25,29	16,28	0,473		24,83	25,71	
0,12	-6,00	17,53	23,53	14,53	0,380		23,17	24,03	
0,13	16,00	5,875	21,87	12,87			21,68	22,50	
0,14	-5,80	14,75	20,55	11,55			20,35	21,13	
0,15	13,60	5,819	19,42	10,41			19,16	19,88	$t_{\text{и6}}$
0,16	-5,80	12,53	18,34	9,33			18,09	18,76	
...	...	...	...	...			...	...	
0,20	-5,60	9,475	15,07	6,07			14,84	15,24	$t_{\text{в1}}$
0,21	8,90	5,488	14,39	5,38			14,23	14,56	
0,22	-5,40	8,363	13,76	4,76			13,68	13,95	
0,23	7,90	5,350	13,25	4,25			13,19	13,39	
0,24	-5,30	7,550	12,85	3,85			12,75	12,89	
0,25	7,20	5,250	12,45	3,45			12,36	12,47	$t_{\text{в6}}$
0,26	-5,20	6,813	12,01	3,01			12,00	12,02	
0,27	6,50	5,163	11,66	2,66			11,69	11,65	
0,28	-5,10	6,300	11,40	2,40			11,41	11,31	$t_{\text{в}}^{\wedge}$
...	...	...	...	...			...	...	
0,40	-4,60	4,913	9,51	0,51			9,63	9,06	
Среднеквадратичная погрешность приближения моделей к опыту:							$\bar{\Delta} = 0,8\text{А}$	$\bar{\Delta} = 1,6\text{А}$	
ВСМ:									
$\tau'_{\text{эф}} = 0,090370 \text{ с}$, $I'_{0\text{эф}} = 26,71 \text{ мм}$, $\tau''_{\text{эф}} = 0,015163 \text{ с}$, $I''_{0\text{эф}} = 8,795 \text{ мм}$, $I_{\infty} = 4,5 \text{ мм}$ - опт.									
ГАМ: $\tau'_{\text{эф}} = 0,1 \text{ с}$, $I'_{0\text{эф}} = 26,4 \text{ мм}$, $\tau''_{\text{эф}} = 0,018 \text{ с}$, $I''_{0\text{эф}} = 10 \text{ мм}$, $I_{\infty} = 4,04 \text{ мм}$									

$$\left. \begin{aligned} i_{0j}(\Delta t) &= i_{\text{и}j}(\Delta t) + \left| I_{\text{в}j}(\Delta t) \right|, j = 2, \overline{K-3}, \\ i_{\text{и}j}(\Delta t) &= \left| 0,375 \cdot I_{\text{в}(j-1)}(\Delta t) + 0,75 \cdot I_{\text{в}(j+1)}(\Delta t) - 0,125 \cdot I_{\text{в}(j+3)}(\Delta t) \right|, \\ i_{\text{и1}}(\Delta t) &= 1,875 \cdot I_{\text{в2}}(\Delta t) - 1,25 \cdot I_{\text{в4}}(\Delta t) + 0,375 \cdot I_{\text{в6}}(\Delta t). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $i_{0j}(\Delta t)$ – элементы между огибающими; 0,375; 0,75; 0,125 – коэффициенты, выведенные для расчета между соседними вершинами интерполяционных узлов $i_{\text{и}j}$ по трем вершинам тока якоря $I_{\text{в}j}$;

1,875; 1,25; 0,375 – коэффициенты для определения величины интерполяционного значения ПП в узле ΔT . Это полностью исключает многочисленные графоаналитические процедуры в стандартах при обработке ПП СМ. Разделение симметричного тока якоря на переходную и сверхпереходную составляющие с установившимся значением по стандартам вносит существенную погрешность и разброс результатов идентификации этих составляющих по зашумленным опытным данным ПП (особенно электромагнитных постоянных времени (ПВ) с начальными значениями составляющих тока якоря). Исходя из этого за базовый случайный признак в ВСМ принята (как оказалось очень удачно) τ_{kj} – постоянная времени, полученная на базе логарифмического декремента синусоидальных колебаний через натуральный логарифм отношения двух соседних амплитуд в исследуемом диапазоне в заданных границах ПП с одной переходной составляющей и установившимся значением тока якоря:

$$\tau'_{kj} = (t'_j - t'_k) / \ln |i'_{ok} / i'_{oj}| = (t'_b - t'_n) / \ln i'_{o,n} / i'_{o,b}. \quad (2)$$

В диапазоне исследования ПП с очищенной от установившегося значения тока якоря переходной составляющей (столбец 5 табл. 1) формируется объем выборки n_b из K элементов i'_{oj} выборками $n = 2$ по комбинаторным формулам [2] с возможностью регулирования объема n_b в любую сторону (см. табл. 2):

$$N_K^n = K! / (n!(K-n)!);$$

$$n_b = \sum_{k=1}^K \sum_{j=k+1}^K \tau'_{kj} + \sum_{k=2}^K \sum_{j=k+1}^K \tau'_{kj} + \sum_{k=3}^K \sum_{j=k+1}^K \tau'_{kj} + \dots \quad (3)$$

Образованная выборка (см. табл. 2) позволяет обнаружить ядро случайного признака по формуле (2) в исследуемом диапазоне ПП, которые отклоняются от МО выборки, ограниченной 6–7-ю суммами, по формуле (3) на минимальную относительную погрешность и выделены жирным шрифтом в табл. 2. Аналитическое обоснование существования таких τ_{kj} -х ПВ представлено в работе [1] и других публикациях. Суть его сводится к получению между нижним и верхним элементами в формуле случайного признака (2) жесткой связи в виде постоянного коэффициента

$$i'_{o,b} = 0,33 i'_{o,n}. \quad (4)$$

Таблица 2

Обнаруженное ядро эффективных точечных выборок

Исходные данные		Выборка n_b случайного признака (τ'_{kj}, c) по ядру					
t_j, c	$i'_{oj}, \text{мм}$	1	2	3	4	5	6
0,10	18,188						
0,11	16,288	0,090632					
0,12	14,538	0,089285	0,087977				
0,13	12,875	0,086844	0,085066	0,082342			
0,14	11,550	0,088096	0,087282	0,086939	0,092079		
0,15	10,419	0,089746	0,089527	0,090056	0,094482	0,097014	
0,162	9,338	0,089996	0,089870	0,090356	0,093386	0,094053	0,091267
0,17	8,313	0,089403	0,089201	0,089450	0,091423	0,091206	0,088556
0,18	7,463	0,089802	0,089685	0,089976	0,091676	0,091576	0,089897
0,19	6,744	0,090715	0,090725	0,091132	0,092783	0,092925	0,091956
0,20	6,075	0,091195	0,091258	0,091685	0,093196	0,093385	0,092691
0,21	5,388	0,090412	0,090390	0,090666	0,091827	0,091791	0,090974
0,22	4,763	0,089555	0,089458	0,089609	0,090496	0,090302	0,089419
0,23	4,250	0,089420	0,089320	0,089445	0,090223	0,090021	0,089217
0,24	3,850	0,090168	0,090132	0,090317	0,091119	0,091024	0,090404
0,25	3,450	0,090233	0,090205	0,090381	0,091122	0,091036	0,090479
0,26	3,013	0,088990	0,088882	0,088948	0,089500	0,089291	0,088650
0,27	2,663	0,088474	0,088343	0,088367	0,088831	0,088591	0,087955

Он позволяет расчетом по формуле (2), с учетом формулы (4) легко извлекать из любой выборки или вариационного ряда такую точечную выборку, которая получила название эффективной точечной выборки $(\tau_{kj})_{\text{эф}}$:

$$(\tau_{kj})_{\text{эф}} = \frac{t_{j\text{эф}} - t_{k\text{эф}}}{\ln|i'_{ок\text{эф}}/i'_{оj\text{эф}}|} = \frac{t_{в\text{эф}} - t_{н\text{эф}}}{\ln|i'_{о,н\text{эф}}/i'_{о,в\text{эф}}|}. \quad (5)$$

МО с дисперсией рассчитываются по известным формулам ТВиМС:

$$\tilde{\tau}' = \frac{1}{n_b} \sum_1^{n_b} \tau'_{kj}, \quad \sigma^2 = \frac{1}{n_b} \sum_1^{n_b} (\tau'_{kj} - \tilde{\tau}')^2. \quad (6)$$

Вариационный ряд случайного признака по выборке (см. ниже) позволяет получать их свойства, проводить широкие исследования с использованием критерия Пирсона, минимизации ряда ЭТВ по Пуассону и другие исследования, которые выходят за рамки нашего доклада и требуют отдельного изложения.

Вариационный ряд $n_{вп}$ случайного признака (τ'_{kj}, c)
по выборке n_b

0,082342	0,088650	0,089445	0,089996	0,090404	0,091132	0,092691
0,085066	0,088831	0,089450	0,090021	0,090412	0,091195	0,092783
0,086844	0,088882	0,089458	0,090056	0,090479	0,091206	0,092925
0,086939	0,088948	0,089500	0,090132	0,090496	0,091258	0,093196
0,087282	0,088990	0,089527	0,090168	0,090632	0,091267	0,093385
0,087955	0,089201	0,089555	0,090205	0,090666	0,091423	0,093386
0,087977	0,089217	0,089609	0,090223	0,090715	0,091576	0,094053
0,088096	0,089285	0,089685	0,090233	0,090725	0,091676	0,094482
0,088343	0,089291	0,089746	0,090302	0,090974	0,091685	0,097014
0,088367	0,089320	0,089802	0,090317	0,091024	0,091791	
0,088474	0,089403	0,089870	0,090356	0,091036	0,091827	
0,088556	0,089419	0,089897	0,090381	0,091119	0,091956	
0,088591	0,089420	0,089976	0,090390	0,091122	0,092079	

При разбросе случайного признака по концам вариационного ряда (табл. 3) более 5 % от его МО осуществляется пятипроцентная вырезка объема случайного признака с целью конструирования по ядру комбинаторного унифицированного выражения на базе четырех ЭТВ по формуле (6), с учетом формулы (4) с наименьшей относительной погрешностью отклонения их от МО для идентификации зашумленной переходной составляющей:

$$n_{эф} = 4; \quad \tilde{\tau}'_{эф} = \frac{1}{4} \sum_{\substack{k_{эф}=1 \\ j_{эф}}}^4 \tau'_{k_{эф}j_{эф}}; \quad MO = \tilde{\tau}'_{эф} = \frac{1}{4} \sum_{\substack{k_{эф}=1 \\ j_{эф}}}^4 \tau'_{k_{эф}j_{эф}};$$

$$\sigma_{эф}^2 = \frac{1}{4} \sum_{\substack{k_{эф}=1 \\ j_{эф}}}^4 (\tau'_{k_{эф}j_{эф}} - \tilde{\tau}'_{эф})^2.$$

Таблица 3

Свойства вариационных рядов для выборочно исследуемой фазы

Параметр	В диапазоне исследования	По ядру	5%-ная вырезка по ядру
Объемы вариационных рядов	153	87	84
Математическое ожидание	0,089500	0,090181	0,090254
Среднеквадратичное отклонение	0,003522	0,001937	0,001511
Разброс случайного признака	0,073744 – 0,101168	0,082342 – 0,097014	0,086844 – 0,094482
Коэффициент вариации	3,93%	2,15%	1,67%

Значения ударного тока в узле ΔT в первой строке табл. 1 по опытным данным (столбцы 3, 4, 7), а также расчетом через ПВ и начальные значения симметричного и асимметричного токов совпадают, что подтверждает точность идентификации переходной составляющей с использованием ядра ЭТВ ПП СМ.

Выводы:

1. Трудоемкость исследования и идентификации переходной составляющей зашумленных ПП СМ благодаря использованию ядра ЭТВ в исследуемом диапазоне ПП снижается в разы.

2. Ограничение объемов вариационных рядов случайного признака с разбросом его по концам до 5 % гарантирует точность и достоверность результатов идентификации зашумленной переходной составляющей, так как коэффициент вариации практически устанавливается ниже 5 %, что подтверждает высокую степень экспоненциального закона затухания процесса.

3. Исследовательские работы следует продолжить для подтверждения получаемого положительного эффекта исследований для более длительных ПП мощных СМ.

Библиографический список

1. Судakov А.И., Чабанов Е.А. Вероятностно-статистические методы исследования и идентификации переходных процессов мощных синхронных машин. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2017. – 295 с.

2. Судakov А.И., Каменских И.А. Идентификация переходной составляющей в зашумленных переходных процессах синхронных машин // Электротехника. – 2018. – № 11.

3. Судakov А.И., Чабанов Е.А., Каменских И.А. Исследования начального смещения первой вершины на величину ударного тока по результатам опыта внезапного короткого замыкания // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2017. – Т. 15, № 9. – С. 7–12.

Сведения об авторах

Судаков Анатолий Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: sudakov38@mail.ru

Каменских Илья Александрович – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ЭМ-17-1м, e-mail: kamenskih.ilya@gmail.com

Фалалеев Дмитрий Викторович – бакалавр Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ЭМ-15-1пб, e-mail: falaleev6@inbox.ru

А.Г. Щербинин, Е.А. Шушкова

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ С СЕКТОРНЫМИ ТОКОПРОВОДЯЩИМИ ЖИЛАМИ

Проведено численное исследование электрических полей силовых кабелей на напряжение 10 кВ с секторными токопроводящими жилами, с помощью которого установлено, что применение экранов по изоляции позволяет существенно снизить максимальное значение напряженности электрического поля. Построены зависимости напряженности поля от толщины изоляции и радиуса закругления секторных токопроводящих жил.

Ключевые слова: напряженность электрического поля, секторная токопроводящая жила, численное исследование.

A.G. Shcherbinin, E.A. Shushkova

NUMERICAL STUDY OF ELECTRIC FIELD POWER CABLES WITH SECTOR CURRENT CONDUCTING

This article conducted a numerical study of the electric fields of power cables for a voltage of 10 kV with sector conductor wires, which established that the use of insulation shields significantly reduces the maximum value of the electric field strength. The dependences of the field strength on the thickness of the insulation and the radius of curvature of the sector conductors are constructed.

Keywords: electric field strength, sector conductor, numerical research.

Надежность работы изоляции кабеля при эксплуатации определяется ее электрической прочностью и соответствием принятого значения напряженности электрического поля максимально допустимой ее величине. Кабель с секторными токопроводящими жилами (ТПЖ) имеет меньший диаметр, чем кабель с круглыми жилами при том же сечении токопроводящих жил, но напряженность электрического поля на ребрах сектора выше, чем на поверхности круглой жилы, поэтому секторные ТПЖ обычно применяют до напряжения 10 кВ включительно [1, 2].

Определим максимальную напряженность электрического поля в кабеле с секторными токопроводящими жилами напряжением 10 кВ, сечением 240 мм² (рис. 1) в зависимости от радиуса закругления секторной жилы r и толщины фазной изоляции $\Delta_{из}$. Также проведем сравнение между конструкциями кабелей без экранов и с экранами по изоляции.

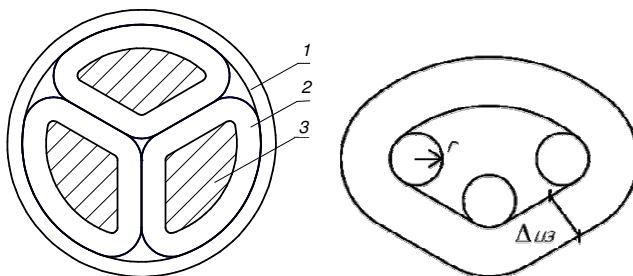


Рис. 1. Поперечное сечение кабеля с секторной ТПЖ:

1 – металлическая оболочка; 2 – полиэтиленовая изоляция; 3 – секторная ТПЖ

При исследовании электрического поля численным методом были сделаны следующие допущения:

1. Электрическое поле не меняется вдоль кабеля (двумерная задача).
2. Диэлектрическая проницаемость постоянна.

С учетом вышеуказанных допущений дифференциальное уравнение принимает вид [1–3]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) = 0, \quad (1)$$

где φ – электрический потенциал; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость.

На металлической оболочке кабеля задается потенциал, равный нулю. При линейном напряжении 10 кВ максимальное напряжение между неэкранированными жилами будет достигать значения 14 142 В, что реализуется для случая, когда на первой жиле потенциал равен 0, на второй – минус 7071 В, а на третьей – плюс 7071 В. Для определения максимального значения напряженности электрического поля в трехжильном кабеле с экранами по изоляции необходимо задать для одной из фаз амплитудное значение напряжения, равное 8165 В, а на экране – равное нулю.

Исследование напряженности электрического поля проводится в программном пакете ANSYS Maxwell. На рис. 2 и 3 приведены распределения напряженности электрического поля при заданных граничных условиях. Из рис. 2 и 3 видно, что максимальные значения напряженности наблюдаются в областях закругления секторных ТПЖ.

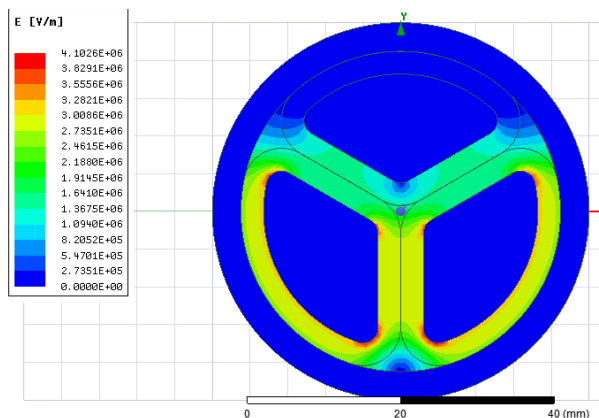


Рис. 2. Распределение напряженности электрического поля в поперечном сечении кабеля без экранов по изоляции

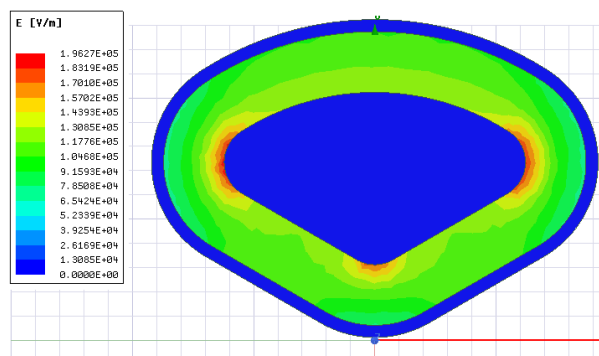


Рис. 3. Распределение напряженности электрического поля в изоляции кабеля с экраном

На рис. 4 и 5 приведены кривые изменения максимального значения напряженности электрического поля для кабелей без экрана и с экранами по изоляции в зависимости от радиуса закругления при разных значениях толщины изоляции. Радиусы закругления изменялись от 1 до 5 мм, а толщины изоляции – от 2 до 6 мм.

Из рис. 4 и 5 видно, что при увеличении радиуса закругления и толщины изоляции происходит снижение максимальной напряженности электрического поля. Сравнение результатов, представленных на рис. 4 и 5, показывает, что наличие экранов позволяет существенно

снизить максимальную напряженность электрического поля. Например, при толщине изоляции 2 мм и радиусе закругления 1 мм снижение максимальной напряженности происходит более чем в 2 раза.

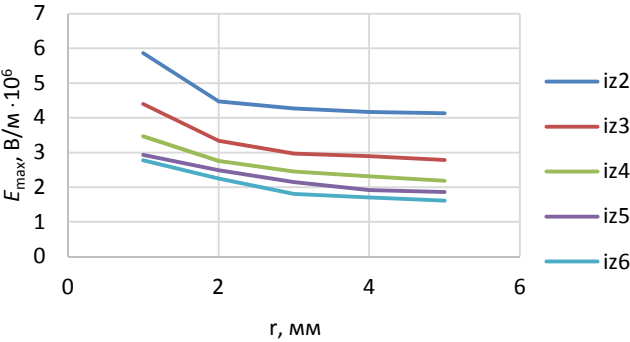


Рис. 4. Зависимость максимальной напряженности от радиуса закругления секторной ТПЖ в кабеле без экранов по изоляции

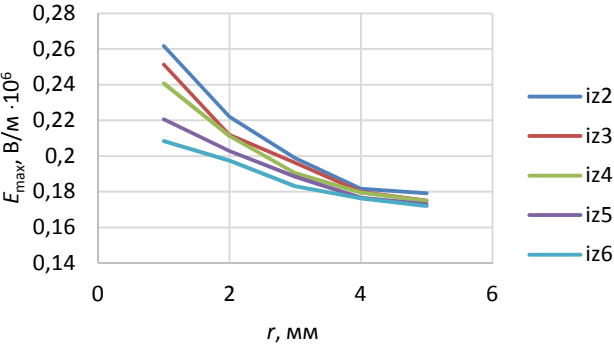


Рис. 5. Зависимость максимальной напряженности от радиуса закругления секторной ТПЖ в кабеле с экранами по изоляции

Таким образом, экранирование по изоляции секторных ТПЖ кабелей на среднее напряжение является целесообразным, поскольку позволяет существенно снижать толщину изоляционного покрытия при заданном допустимом значении напряженности электрического поля. Метод исследования электрических полей кабелей, использованный в работе, является эффективным при разработке и проектировании новых конструкций кабельных изделий.

Библиографический список

1. Основы кабельной техники / под ред. И.Б. Пешкова. – М.: Академия, 2006. – 432 с.
2. Щербинин А.Г., Кабирова А.И. Математическое моделирование электрического поля кабеля с жилами секторной формы // Научно-технический вестник Поволжья. – 2017. – № 5. – С. 178–180.
3. 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.

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

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

И.А. Попов, Е.В. Субботин

КОМПОНЕНТНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗИНОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ НЕФТЕПОГРУЖНЫХ КАБЕЛЕЙ

Приводятся результаты комплексных экспериментальных исследований методами инфракрасной спектроскопии, термогравиметрического и рентгено-спектрального анализа резиновой изоляции нефтепогружного кабеля. По результатам компонентного анализа установлены наиболее вероятные причины критического падения электрического сопротивления исследуемого полимера при температурном воздействии.

Ключевые слова: нефтепогружной кабель, резиновая изоляция, экспериментальные исследования.

I.A. Popov, E.V. Subbotin

COMPONENT ANALYSIS OF RUBBER INSULATION OIL-SUBMERSIBLE CABLE

This article presents the results of a comprehensive experimental study using infrared spectrometry, thermogravimetric and X-ray spectral analyzes of rubber insulation of a submersible cable. According to the results of the component analysis, the most probable causes of the critical drop in the electrical resistance of the polymer under investigation under temperature exposure were established.

Keywords: oil-submersible cable, rubber insulation, experimental studies.

На сегодняшний день нефтепогружной кабель является важной составляющей системы питания установок электроцентробежного насоса. Следует отметить, что тяжелые условия работы, такие как высокие температура и давление, воздействия агрессивных сред, могут в значительной степени ограничивать срок службы данного кабельного изделия или приводить к существенному снижению его эксплуатационных характеристик [1]. На практике часто встречается проблема критического снижения сопротивления резиновой изоляции при воздействии высоких температур 180–200 °С.

В работе проводится сравнительный анализ компонентного состава двух образцов резиновой изоляции нефтепогружных кабелей с целью установления причины критического снижения электрического сопротивления одного из образцов (образец 1). Комплексные экспериментальные исследования проводились с помощью методов ин-

фракрасной спектроскопии, термогравиметрического и рентгено-спектрального анализа [2]. На рис. 1 и 2 представлены результаты термогравиметрического анализа.

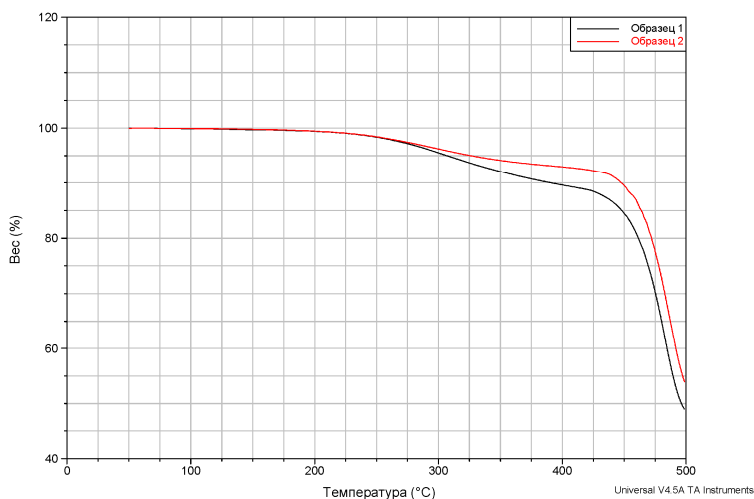


Рис. 1. Температурные зависимости потери массы образцов резиновой изоляции при нагреве со скоростью 10°C/мин

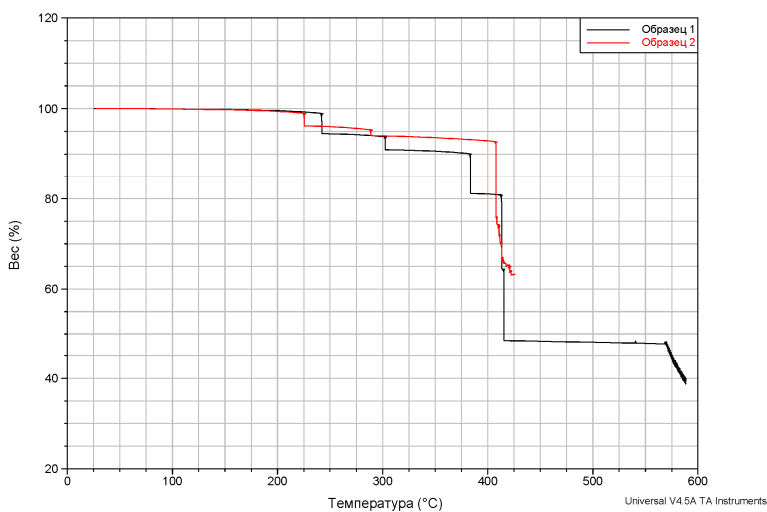


Рис. 2. Температурные зависимости потери массы образцов резиновой изоляции, полученные в автопошаговом режиме

По результатам термогравиметрического анализа видно, что после 400 °С начинается интенсивное разложение основы резиновой изоляции исследуемых образцов. Причем схожий характер кривых свидетельствует о близком химическом составе каучуков.

В диапазоне температур от 200 до 400 °С наблюдается потеря массы, предположительно связанная с разложением пластификаторов. К моменту начала деструкции каучуковой основы (400 °С) разница достигает порядка 10 %. Это говорит о меньшем количестве пластификаторов в образце 2. Кроме того, следует учитывать, что состав и молекулярно-массовое распределение пластифицирующих добавок могут отличаться. На рис. 3 представлено наложение инфракрасных спектров двух образцов.

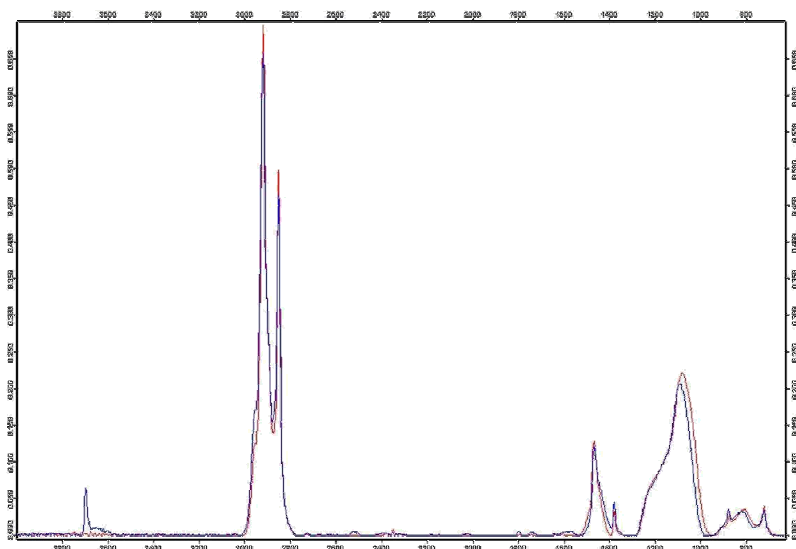


Рис. 3. Сравнение спектров образца 1 (синяя линия) и образца 2 (красная линия)

В результате обработки экспериментальных данных, представленных на рис. 3, установлено, что корреляция спектров исследуемых образцов составляет 98,87 %. Отличия в определенной части спектра вероятнее всего связаны с различным содержанием пластификатора. Можно сделать предположение, что в образце 2 данный пластификатор либо отсутствует, либо его содержание ничтожно мало, что согласуется с данными термогравиметрического анализа. На рис. 4, 5 представлены рентгенограммы исследуемых образцов.

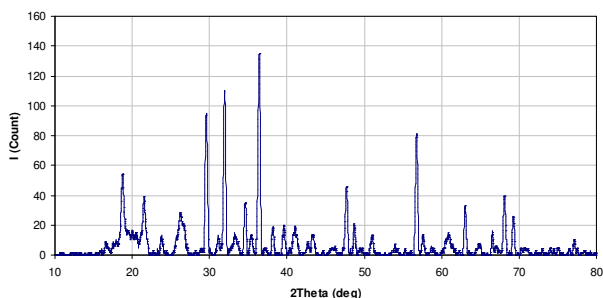


Рис. 4. Рентгенограмма образца 1

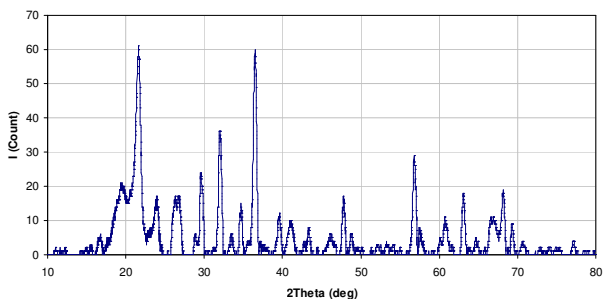


Рис. 5. Рентгенограмма образца 2

По результатам рентгенофазового анализа можно сделать следующие выводы:

- в обоих образцах присутствует аморфная составляющая, идентифицировать которую с использованием рентгенофазового анализа не представляется возможным;
- рентгенограммы обоих образцов имеют схожий характер, что свидетельствует о близком составе. Отличие может заключаться в количественном содержании кристаллических фаз и различном примесном составе;
- основные пики на рентгенограммах образцов являются характерными для следующих веществ: ZnO (структура минерала Zincite, пространственная группа $R\bar{6}3mc$); CaCO_3 (структура минерала Calcite, пространственная группа $R\bar{3}c$); Al_2O_3 (структура минерала Corundum, пространственная группа $R\bar{3}c$); SiO_2 (структура минерала Quartz, пространственная группа $P3221$);
- также на рентгенограмме присутствуют пики, не относящиеся к представленным веществам. Однозначно идентифицировать данные

пики невозможно, так как они являются характерными для нескольких веществ. В основном это алюмосиликаты сложного состава.

Результаты измерения элементного состава образцов с помощью рентгеноспектрального анализа в режиме анализа по площади представлены в таблице.

Результаты измерения элементного состава

Образец	C, мас. %	O, мас. %	Al, мас. %	Si, мас. %	Zn, мас. %	Ca, мас. %	K, мас. %	Mg, мас. %	Fe, мас. %	S, мас. %	Ti, мас. %
1	62,75	19,10	7,56	6,12	2,55	1,01	–	0,69	0,07	–	0,15
2	47,04	27,57	11,10	10,05	1,90	0,97	0,51	0,50	0,23	0,13	–

По результатам проведенных комплексных экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

1) каучуковая основа исследуемых образцов резиновой изоляции имеет близкий химический состав. Однако следует учитывать, что марки каучуков и степень сшивки резин могут отличаться;

2) в образце 2 содержится ориентировочно в 2 раза меньшее количество пластифицирующих добавок, чем в образце 1;

3) образец 2 имеет большее количество наполнителя по сравнению с образцом 1.

Таким образом, наиболее вероятной причиной сильной температурной зависимости электрического сопротивления одного из образцов (образец 1) является миграция пластификатора.

Библиографический список

1. Новиков Д.В., Харченко Д.А. Кабели для электропитания установок электроцентробежных насосов добычи нефти [Электронный ресурс] // Кабели и провода. – 2014. – № 1. – URL: http://www.kp-info.ru/kp_archive.html

2. Дик Дж.С. Технология резины: Рецептуростроение и испытания. Практическое руководство. – СПб.: Научные основы и технологии, 2010. – 620 с.

Сведения об авторах

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

Е.А. Елтышев, В.А. Трефилов

ПРИМЕНЕНИЕ ПОПЕРЕЧНОЙ КОМПЕНСАЦИИ ПРИ ПИТАНИИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПО ПРОТЯЖЕННОЙ ЛИНИИ

Представлены некоторые результаты исследования влияния поперечной компенсации реактивной мощности на работу асинхронного двигателя при его питании по протяженной линии. Исследование проводилось на математической модели схемы электроснабжения двигателя в среде Simulink пакета MatLab.

Ключевые слова: длинная линия, асинхронный двигатель, поперечная компенсация, режимы работы.

E.A. Eltyshv, V.A. Trefilov

APPLICATION OF TRANSVERSE COMPENSATION AT POWER SUPPORT OF AN ASYNCHRONOUS MOTOR ON THE EXTENDED LINE

This article presents some results of the study of the effect of transverse compensation of reactive power on the operation of an induction motor when it is powered over an extended line. The study was conducted on a mathematical model of the engine power supply circuit in the MatLab package Simulink environment.

Keywords: long line, asynchronous motor, transverse compensation, operating modes.

На газокompрессорных станциях для перекачки природного газа широко применяются асинхронные двигатели большой мощности. Нередко эти станции получают питание от источников электрической энергии по длинным воздушным линиям электропередачи (ЛЭП). Так, например, электроснабжение газокompрессорной станции «Чашкино» осуществляется от подстанции 110 кВ по воздушной ЛЭП длиной 4,5 км. На станции для перекачки газа применяются два асинхронных двигателя мощностью по 1250 кВт, напряжением 6 кВ. Собственные нужды станции составляют: активная мощность 200 кВт, реактивная мощность 100 кВАр. Значительная протяженность ЛЭП приводит к существенной потере напряжения в узле нагрузки не только в режиме пуска, но и в рабочем режиме двигателя.

В настоящей работе представлены некоторые результаты влияния применения поперечной компенсации на режимы работы одного работающего асинхронного двигателя. Объектом исследования является асинхронный двигатель мощностью 1250 кВт.

Simulink-модель схемы электроснабжения асинхронного двигателя приведена на рис. 1. В этой модели: 1 – источник напряжения; 2 – трехфазный трансформатор; 3 – блок измерения напряжения; 4 – блок линии электропередачи; 5 – блок измерения напряжения в узле нагрузки; 6 – блок батареи конденсаторов; 7 – блок собственных нужд станции; 8 – трехфазный асинхронный двигатель; 9 – шина выходных параметров двигателя.

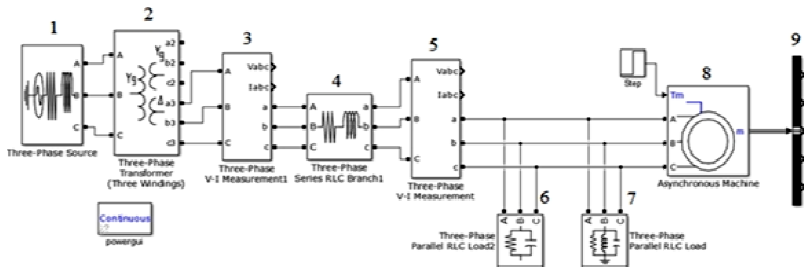


Рис. 1. Математическая модель схемы электроснабжения двигателя

На модели исследованы пусковые и рабочие режимы работы асинхронного двигателя при изменении длины ЛЭП от 1 до 10 км.

На рис. 2 приведена осциллограмма пуска двигателя при длине ЛЭП $l = 1$ км, на которой представлены временные зависимости тока двигателя I_1 , скорости вращения n и напряжения на двигателе U_1 .

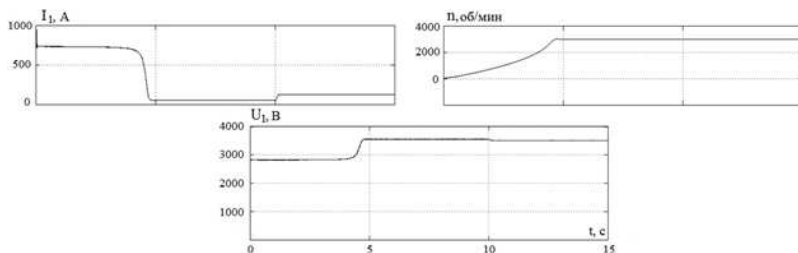


Рис. 2. Осциллограмма пуска двигателя при длине ЛЭП 1 км

На рис. 3 приведена осциллограмма пуска двигателя при длине линии электропередачи $l = 9$ км.

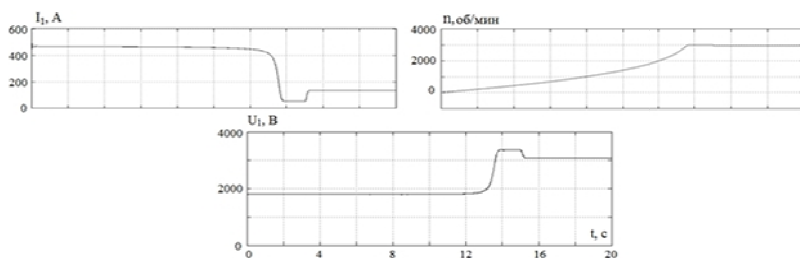


Рис. 3. Осциллограмма пуска двигателя при длине ЛЭП 9 км

Сравнение осциллограмм рис. 2 и 3 показывает существенное влияние протяженности линии на режимы работы АД. В табл. 1 представлены результаты исследования этих режимов при изменении длины ЛЭП от 1 до 10 км.

Таблица 1

Результаты исследования режимов при изменении
длины ЛЭП от 1 до 10 км

Длина ЛЭП l , км	Отклонение напряжения ΔU , %	Пусковой ток $I_{п}$, А	Время пуска $t_{п}$, с	Установившееся значение тока $I_{у}$, А
1	0	720	4,8	120
2	0,3	685	5,3	121
3	1,7	640	6,1	122
4	3,3	605	7,1	123
5	4,9	570	8,1	125
6	6,6	540	9,3	126
7	8,3	515	10,6	128
8	10,0	490	11,9	130
9	11,1	465	13,7	132
10	13,6	445	15,4	134

Анализ проведенных исследований при увеличении длины ЛЭП показывает:

- отклонение напряжения на двигателе увеличивается;
- величина пускового тока снижается, а значение тока в установившемся режиме после запуска увеличивается;
- время пуска двигателя возрастает.

В соответствии с ГОСТ 13109–97 на качество электроэнергии, нормальное отклонение напряжения на потребителе не должно превы-

шать величину $\pm 5\%$. Из табл. 1 следует, что уже при длине ЛЭП свыше 5 км отклонение напряжения превышает установленную норму.

Отклонение напряжения достаточно точно рассчитывается по формуле

$$\Delta U = \frac{(Pr_0 + Qx_0)l}{U_{\text{ном}}},$$

где l – длина линии, км; r_0 , x_0 – погонные активные и реактивные сопротивления, Ом/км; P – активная мощность в узле нагрузки, Вт; Q – реактивная мощность в узле нагрузки, ВАр; $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение узла нагрузки, В.

Отклонение напряжения в процентах

$$\Delta U \% = \frac{\Delta U}{U_{\text{ном}}} 100 \%.$$

Для уменьшения величины отклонения можно применить поперечную компенсацию реактивной мощности. Наиболее просто эта компенсация осуществляется подключением батареи конденсаторов (БК) в узел нагрузки.

Формула для расчета значения отклонения напряжения с компенсацией реактивной энергии

$$\Delta U = \frac{(Pr_0 + (Q - Q_{\text{БК}})x_0)l}{U_{\text{ном}}},$$

где $Q_{\text{БК}}$ – мощность батареи конденсаторов.

Расчет мощности батареи конденсаторов проведен для длины ЛЭП 6–10 км с условием обеспечения отклонения напряжения в узле нагрузки $\Delta U \% = 5\%$. В качестве примера на рис. 4 приведена осциллограмма пуска двигателя с применением поперечной компенсации при длине ЛЭП $L = 9$ км.

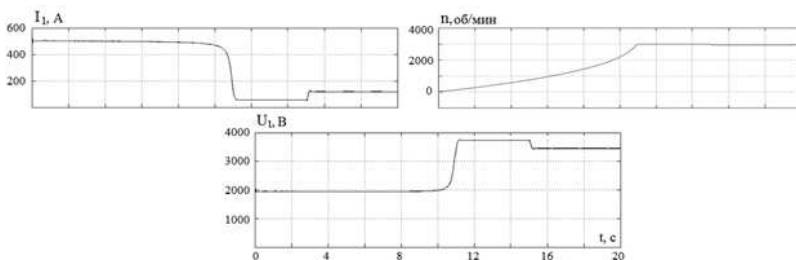


Рис. 4. Осциллограмма пуска двигателя при длине ЛЭП 9 км с применением поперечной компенсации

Сравнительный анализ осциллограмм рис. 3 и 4 показывает, что при применении поперечной компенсации время пуска уменьшается. Результаты исследования режимов работы двигателя при применении поперечной компенсации, при которой величина отклонения напряжения $U \% = 5 \%$, сведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты исследования режимов работы двигателя при применении поперечной компенсации, при которой величина отклонения напряжения $U \% = 5 \%$

Длина ЛЭП l , км	Мощность БК Q_b , кВАр	Пусковой ток $I_{1п}$, А	Время пуска $t_{п}$, с	Установившееся значение тока $I_{1у}$, А
6	645	572	8,1	118
7	681	546	9,9	118
8	717	524	10,0	118
9	753	505	11,2	118
10	790	483	12,4	118

Сравнительный анализ данных табл. 1 и 2 при длине ЛЭП 6–10 км показывает, что при одной и той же длине ЛЭП значения пускового тока $I_{1п}$ при применении поперечной компенсации больше, чем значения этих же величин при ее отсутствии. Длительность пуска $t_{п}$ уменьшается, а величина установившегося тока $I_{1у}$ остается неизменной.

Проведенные исследования позволяют сделать следующий вывод: применение поперечной компенсации реактивной мощности позволяет снизить посадку напряжения при пуске, сократить продолжительность времени пуска двигателя, обеспечить работу двигателя в установившемся режиме при нормальном отклонении напряжения и неизменном токе.

Библиографический список

1. Суднова В.В. Влияние качества электроэнергии на работу электроприемников / ЗАО «Энергосервис». – М., 2000. – 80 с.
2. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink. – СПб.: Питер, 2007. – 288 с.

3. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

Сведения об авторах

Елтышев Евгений Алексеевич – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ЭМ-15-1пб, 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: tvapniru@mail.ru

Т.Д. Белоглазова, Е.В. Субботин

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПРИ ВХОДНОМ КОНТРОЛЕ КАБЕЛЬНОГО ПВХ-ПЛАСТИКАТА

Рассматривается возможность использования методов термического анализа как дополнительного способа входного контроля поступающих на кабельное предприятие полимерных материалов. Приводятся результаты термогравиметрии изоляционного ПВХ-пластиката.

Ключевые слова: ПВХ-пластикат, входной контроль, термогравиметрический анализ.

T.D. Beloglazova, E.V. Subbotin

APPLICATION OF THE METHODS OF THERMAL ANALYSIS FOR INPUT CONTROL OF CABLE PVC COMPAUNDS

The paper discusses the possibility of using thermal analysis methods as an additional method to control the input of polymer materials entering the cable installation. The results of insulated PVC compaund thermogravimetry are presented.

Keywords: PVC compaund, input control, thermogravimetric analysis.

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 рецептуры с низким дымовыделением.

В связи с этим экономически оправданным будет расширение кабельными предприятиями списка методов входного контроля современных ПВХ-пластикатов, чтобы на ранней стадии иметь возможность оценить вероятность успешного прохождения готовым изделием стандартных испытаний на пожарную безопасность (табл. 1).

Таблица 1

Стандартные методы испытаний кабельных изделий
на пожарную безопасность

№ п/п	Обозначение НД	Наименование НД
1	ГОСТ ИЕС 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 смещением газов
2	ГОСТ ИЕС 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 ИЕС 61034-2–2011	Измерение плотности дыма при горении кабелей в заданных условиях. Часть 2. Метод испытания и требования к нему

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 о качестве сырья 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.

Сами испытания состоят из трех экспериментов, в процессе проведения которых разные пробы материала, нагреваясь со скоростью 20 °С/мин в среде инертного газа, проходят через несколько стадий разложения. Полученные в результате кривые потери массы для одной из марок изоляционного ПВХ-пластиката приведены на рис. 1.

Из анализа полученных зависимостей видно, что до 260 °С образец термостабилен, интенсивная же потеря массы начинается при достижении температуры 282 °С (рис. 2).

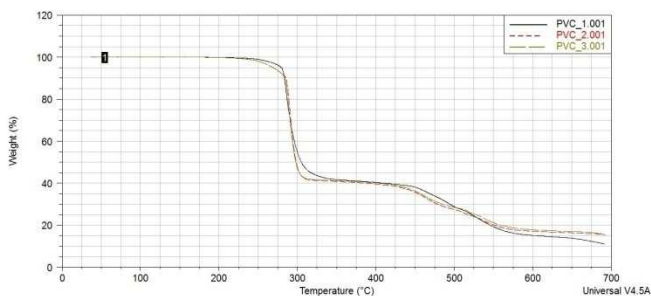


Рис. 1. Кривые потери массы изоляционного ПВХ-пластиката

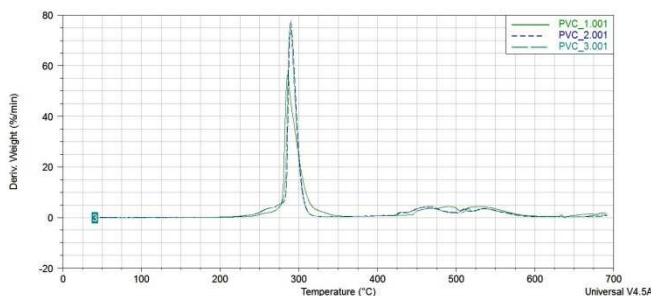


Рис. 2. Температурные зависимости скорости потери массы изоляционного ПВХ-пластиката

В процессе обработки экспериментальных данных определяются параметры, представленные в табл. 2.

Таблица 2

Результаты термогравиметрии изоляционного ПВХ-пластиката

Потеря массы Δm , %, при температуре, °C						Коксовый остаток, %, при $T = 420$ °C	Зольный остаток, %, при $T = 691$ °C
Δm_{cp}	Δm_{100}	Δm_{200}	Δm_{300}	Δm_{400}	Δm_{500}		
	0,03	0,167	50,2	59,96	71,69		
S	0,019	0,025	4,319	0,39	0,74	25,19	14,09
Температура, °C, при потере массы			T_5 %		T_{10} %	T_{20} %	T_{50} %
T_{cp}			272,47		284,24	287,96	300,45
S			6,25		0,95	1,13	4,01
Характеристика максимумов ДТГ-пиков в температурном интервале (температура максимума T_{max} , °C/максимальная скорость потери массы A_{max} , %/мин ⁻¹)							
Интервал, °C		263,21–325,37					
$T_{max\ cp}/A_{max\ cp}$		4,15					
S/S		0,16					

В дальнейшем, после сравнения результатов термогравиметрического анализа идентификатора (см. рис. 1, 2 и табл. 2) и поступающего на кабельное предприятие ПВХ-пластиката, будет приниматься решение о возможности использования последнего в производстве.

Библиографический список

1. ГОСТ Р 53293–2009. Пожарная опасность веществ и материалов. Материалы, вещества и средства огнезащиты. Идентификация методами термического анализа.

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 – студентка Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. МЭ-15-16, 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

А.Н. Гусин

РАЗРАБОТКА ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ СБОРА ДАННЫХ В СЕТЯХ 0,4 кВ ПО ПРОТОКОЛУ PLC-I

Рассмотрены особенности программного обеспечения, применяемого в качестве АСКУЭ для небольших организаций с использованием оборудования марки «Меркурий». Затронуты вопросы разработки кросс-платформенного приложения для управления оборудованием PLC-I и сбором данных как решения начального уровня.

Ключевые слова: АСКУЭ, Меркурий, PLC.

A.N. Gusin

APPLICATION DEVELOPMENT FOR 0.4 kV NETWORK DATA COLLECTION BY PLC-I PROTOCOL

The article describes the features of the software used as AMR for small organizations using the equipment of the brand "Mercury". The issues of cross-platform application development for PLC-I equipment control and data collection as an entry-level solution were touched upon.

Keywords: AMR, Mercury, PLC.

Управление электрическими сетями важно как на уровне крупных распределительных систем типа городских энергосбытов, так и на уровне сравнительно небольших групповых потребителей – ТСЖ, управляющих компаний, садоводческих товариществ и гаражных кооперативов.

Если в случае жилого сектора сбор показаний потребления электроэнергии в большей мере ориентирован на индивидуальных потребителей и отчасти является головной болью «Энергосбыта», то в случае товариществ и кооперативов проблемы учета электроэнергии становятся проблемами руководителей этих объединений граждан. Энергосбыт отпускает электроэнергию юридическому лицу по вводимому коммерческому счетчику, а расчеты с физическими лицами переходят к конечному поставщику, в роли которого выступает кооператив. Руководству кооперативов приходится решать во многом те же задачи (учета, снижения потерь и др.), что и более крупным поставщикам ресурсов, только в условиях ощутимо меньшего бюджета.

Одним из доступных аппаратных решений для АСКУЭ является хорошо зарекомендовавшая себя система на основе технологии PLC первого поколения производства ООО «Инкотекс», в основе которой лежит передача данных по силовой сети 0,4 кВ, позволяющая обойтись без прокладки дополнительных линий связи к абонентским счетчикам (рис. 1). Ядром системы являются концентраторы данных «Меркурий-225.1», управляющие процессом сбора данных со счетчиков.

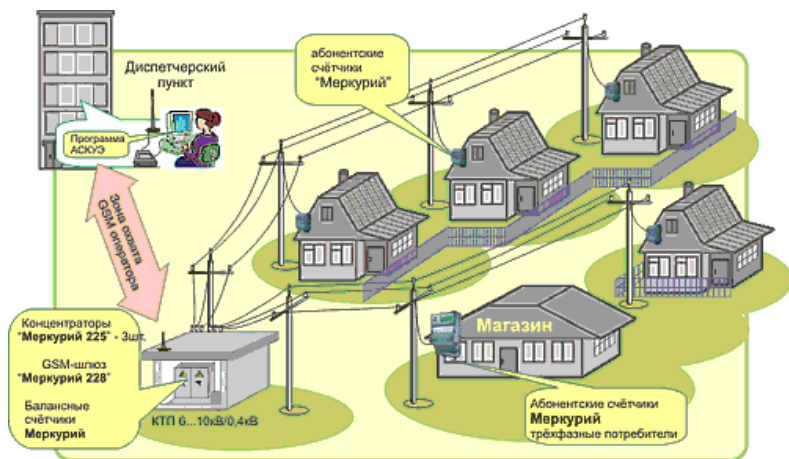


Рис. 1. Типовая схема аппаратной среды PLC

Ввод аппаратной части в эксплуатацию существенных трудностей не представляет, предполагая прописывание сетевых адресов счетчиков с помощью вспомогательного оборудования и установку их у потребителей. Концентраторы подключаются каждый на свою фазу как обычные бытовые приборы, подобно размещенным на стенде (рис. 2) четырем устройствам. Силовая сеть в нашем случае одновременно является и информационной. Кроме того, обмен данными со счетчиками возможен и по более скоростным каналам, например через оптопорт и шины CAN / RS-485.

Что же касается человеко-машинного взаимодействия, то для неподготовленного пользователя порог вхождения при работе с системой существенно выше. По сути, основных вариантов два: бесплатное ПО от производителя и платное ПО от сторонних разработчиков.



Рис. 2. Испытательный стенд для работы с АСКУЭ

Платное ПО обычно предполагает широкие возможности для получения всевозможных показателей от аппаратной части системы, однако, как и любое специализированное ПО, требует квалифицированного сотрудника для своего использования. Такое решение более чем уместно для энергосбытовой организации, но оказывается излишне дорогим и избыточным по возможностям для небольших и неспециализированных организаций.

Последние чаще всего обращаются к бесплатным решениям. К таковым относятся программы VMonitor и VQuark, доступные на сайте производителя. Первая позволяет выполнять определенные настройки концентратора и отображать получаемые из него данные. Вторая предназначена для сбора накопленных данных и управления счетчиками. Основную сложность для пользователей ПО представляет понимание логики работы этих приложений и формирование файлов заданий для опроса оборудования. Последняя задача представляет собой создание структурированного текстового документа, учитывающего аппаратную архитектуру АСКУЭ конкретного объекта автоматизации, и является нетривиальной даже для опытного пользователя ПК. При этом файл задания является не только входным документом для программы, но и служит одновременно средством хранения полученных результатов. Решение некоторых задач посредством

этого файла требует знаний уровня программиста, что никак нельзя отнести к достоинствам программного решения.

Поскольку ранее мною была развернута аппаратная часть АСКУЭ на основе оборудования марки «Меркурий» в гаражном кооперативе, было принято решение изучить аппаратные протоколы [1] и создать на их основе свободно распространяемое ПО. В качестве программной основы была взята библиотека Qt [2], позволяющая создать приложение под большинство операционных систем.

Во главу угла при разработке была поставлена задача создания дружелюбного для неопытного пользователя интерфейса, требующего минимум данных для ручного ввода. Проект организован как объектно-ориентированное приложение с разделением классов бизнес-логики и пользовательского интерфейса. Для реализации пользовательского интерфейса широко применяется архитектура «модель-представление» с применением собственных делегатов. Работа с последовательными портами разнесена по отдельным потокам. После запуска наше приложение LMonitor самостоятельно обнаруживает подключенные посредством USB-интерфейса концентраторы «Меркурий» и одноименные трехфазные счетчики (рис. 3).

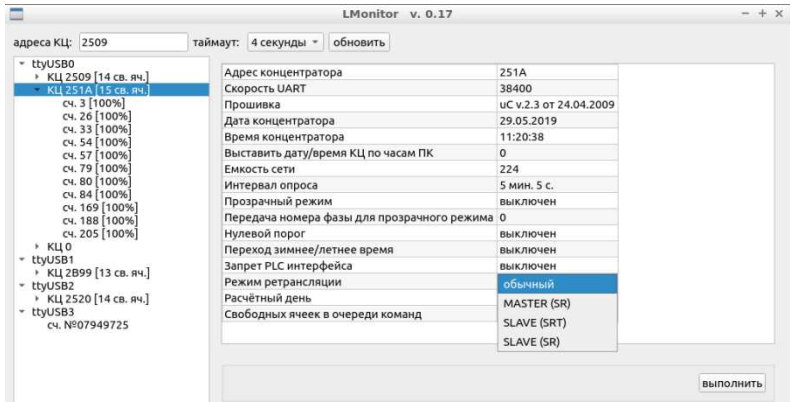


Рис. 3. Форма пользовательского интерфейса концентратора «Меркурий»

Для концентраторов, после опроса их настроек, опрашивается буфер последних пакетов и буфер последних месяцев. При включенном прозрачном режиме работы концентратора можно наблюдать за поступлением новых пакетов от абонентских счетчиков в истории пакетов для каждого прибора учета (рис. 4).

История показаний

ИД 25109 [14 св. яч.]

сч. 1 [100%]
сч. 8 [100%]
сч. 35 [100%]
сч. 95 [100%]
сч. 110 [100%]
сч. 135 [100%]
сч. 161 [100%]
сч. 206 [100%]
сч. 221 [100%]
сч. 222 [100%]

ИД 25109 [14 св. яч.]

сч. 3 [100%]
сч. 26 [100%]
сч. 33 [100%]
сч. 54 [100%]
сч. 57 [100%]
сч. 79 [100%]
сч. 80 [100%]
сч. 84 [100%]
сч. 169 [100%]
сч. 188 [100%]

Тип счётчика: трёхфазный

Последние показания, кВтЧ: 293.00

Тариф: Т2

История пакетов:

Дата и время	Показания
28.04.19 14:45	41 41 01 00 2B
28.04.19 14:45	41 41 01 00 2B
31.03.19 23:59	41 41 01 00 2B
28.02.19 23:56	41 3F 01 00 27
12.11.18 07:00	11 3E 01 00 00

30.09.18 31.10.18 30.11.18 31.12.18 12.01.19 31.01.19 28.02.19 31.03.19 28.04.19

Тариф 1 840.00 889.00 903.00 904.00

Тариф 2 293.00 301.00 304.00 318.00 318.00 319.39 319.39 321.43 321.4

короткая | взять точный срез | суммарное потребление электроэнергии | выполнить

* tlyu581 КЦ Z899 [14 св. кв.] сч. 2 [A 100%] сч. 6 [A 20%] сч. 7 [100%] сч. 14 [100%] * tlyu583 сч. N07949725	Тип счётчика	трёхфазный
	Последнее показание, кВтч	0.02
	Тариф	T2 (суточный срез)
	Слово состояния	ошибка оборудования при выполнении самодиагностики напряжение батарей опустело ниже нормы напряжение фазы 'В' вышло за пределы нормы напряжение батарей опустело ниже нормы корпус счётчика был вскрыт
	Предшущее слово состояния	корректировалось тарифное расписание или список праздничных дней по внешней команде корректировалось время или дата напряжение фазы 'В' вышло за пределы нормы
	Подключен на фазу	A
	История пакетов	
	25.04.19 00:45	48 98 AC EO 00
	25.04.19 00:24	10 03 00 00 24
	25.04.19 00:36	40 02 00 00 59
	25.04.19 00:45	48 98 AC EO 00
	29.05.19 11:32	DC 03 10 02 49
	29.05.19 11:36	49 83 34 BA DC
	29.05.19 11:39	41 00 00 00 02
	25.04.19 29.05.19	
	Тариф 1	2.89
	Тариф 2	0.02

короткая

выбрать передаваемый параметр

начало текущих суток по тарифу T1

начало текущих суток по тарифу T2

начало текущих суток по тарифу T3

начало текущих суток по тарифу T4

последействие цепи 30 мин активной мощности A+

32-битный серийный номер счётчика

унифицированное слово состояния

Помимо доступа к уже собранной концентратором информации о потребленной электроэнергии у обслуживающего персонала возникают и другие специфические задачи: отключения-подключения нагрузки, получение дополнительных данных, изменение тарифного расписания, настройка параметров работы прибора учета. Для решения этих задач протокол PLC-I содержит два вида команд: короткие и длинные. Первые предусматривают отправку пятибайтовой последовательности, длина вторых – переменная и определяется протоколом самого счетчика. Время выполнения одной длинной команды может доходить до получаса. При этом чаще всего требуется не менее двух длинных команд для реализации желаемой задачи. Несмотря

на очевидные неудобства длительного ожидания, у обслуживающего персонала может не быть иного способа изменить настройки абонентского счетчика: к последнему может отсутствовать физический доступ в нужное время.

В любом случае, помимо отправки самой команды, пользователь должен получить подтверждение о выполнении или невыполнении оной (рис. 5). Логичным решением стал бы индикатор выполнения команды, показывающий пользователю расчетное время получения ответа от счетчика.

В настоящее время программа LMonitor находится в стадии доводки и подготовки к выпуску. Первый выпуск предусматривает устранение очевидных недоработок, в последующих предполагается реализация наиболее востребованных возможностей длинных команд.

Библиографический список

1. Система сбора данных «Меркурий-PLC-I». Техническое описание // Информ.-справ. портал. – 2012. – URL: <https://www.incotexcom.ru/support/docs> (дата обращения: 13.04.2018).

2. Шлее М. Qt 5.10. Профессиональное программирование на C++. – СПб.: БХВ-Петербург, 2018. – 1072 с.

Сведения об авторе

Гусин Александр Николаевич – старший преподаватель кафедры «Информационные технологии и автоматизированные системы» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: gusin@pstu.ru

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА ПРИ СИЛАНОВОЙ СШИВКЕ

Рассмотрены две нестационарные двумерные математические модели процессов тепломассообмена в ванне с кабелем с силаносшиваемой изоляцией, намотанным на барабан. В одной из моделей кабель заменен на материал с усредненными свойствами. Проведена оценка работоспособности двух предложенных моделей. Определена возможность использования модели с кабелем на упрощенную модель с монолитной плитой для снижения расчетной нагрузки.

Ключевые слова: вулканизация, силановая сшивка, теплообмен, кабель, вода, математическая модель.

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

STUDY OF THE HEAT EXCHANGE PROCESS IN SILAN BENDING

The article was reviewed by two non-stationary two-dimensional mathematical model of heat and mass transfer processes in the bath silvanoshei cable with insulation wound on a drum. In one of the models, the cable is replaced by a material with averaged properties. The performance of the two proposed models was evaluated. The possibility of using a model with a cable on a simplified model with a monolithic plate, to reduce the design load.

Keywords: vulcanization, silane crosslinking, heat exchange, cable, water, mathematic model.

Для улучшения электрических и механических характеристик изоляции из полиэтилена производят его сшивку или, как еще называют этот процесс, вулканизацию. Процесс сшивки полиэтилена может производиться разными способами (пероксидная, силановая, радиационная), при этом между молекулами создаются дополнительные поперечные связи и полимер приобретает сетчатую структуру. Подробно процессы сшивания описаны в статье [1].

Силанольное сшивание происходит во влажной среде (пар, вода) при температуре 80–90 °С. Под воздействием влаги происходит гидролиз силанольных групп и последующее их сшивание, ускоряющееся под действием тепла и катализатора.

При рассмотрении процесса сшивки был выбран кабель марки АПвБВ 1х300/6 кВ длиной 500 м [2]. Кабель наматывается на барабан 12 см с размерами: длина шейки – 800 мм, диаметр шейки – 650 мм, диаметр щеки – 1220 мм. Используется ванна шириной 2400 мм и высотой 2940 мм, в которой находится горячая вода.

При создании математической модели процессов тепломассопереноса сделаны следующие допущения:

- течение воды в ванне ламинарное;
- теплофизические свойства твердых материалов постоянны;
- среда несжимаемая;
- реализуется условие идеального контакта на границе раздела разнородных сред.

– на левой стенке и крышке задано условие адиабатического теплообмена;

- 200

Начальная температура жилы, изоляции и барабана – 20 °С, температура воды – 90 °С

Математическая модель, описывающая процессы теплообмена, основывается на уравнениях неразрывности, движения, энергии [3]. Система дифференциальных уравнений имеет следующий вид:

– уравнение неразрывности

$$-\rho_B \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) = \frac{\partial \rho_B}{\partial t} + v_x \frac{\partial \rho_B}{\partial x} + v_y \frac{\partial \rho_B}{\partial y}; \quad (1)$$

– уравнения движения:

$$\rho_B \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) = \mu_B \Delta v_x, \quad (2)$$

$$\rho_B \left(\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) = \mu_B \Delta v_y + \rho_B \beta (T - T_0) g; \quad (3)$$

– уравнения энергии:

$$c_B \rho_B \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda_B \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (4)$$

$$c_{из} \rho_{из} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda_{из} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (5)$$

$$c_{ТПЖ} \rho_{ТПЖ} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda_{ТПЖ} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (6)$$

$$c_6 \rho_6 \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda_6 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right).$$

Плотность воды определяется законом

$$\rho_B(T) = \rho_0 [1 - \beta_B (T - T_0)],$$

где x, y – декартовы координаты; ρ, c, λ – плотность, кг/м³, теплоемкость, Дж/кг·°С, коэффициент теплопроводности жилы, изоляции, воды и барабана, Вт/м·°С; T – температура, °С; $v_{x,y}$ – векторы скорости в направлении своих координат; μ_B – динамическая вязкость воды, Па·с; $\Delta v_{x,y}$ – оператор Лапласа; β – температурный коэффициент плотности воздуха; g – ускорение свободного падения, м/с².

Реализация разработанной математической модели осуществлялась методом конечных элементов в среде ANSYS.

Для упрощения расчетов в первой модели были заменены витки кабеля на монолитную конструкцию (рис. 2) с усредненными физическими свойствами. В системе уравнений для упрощенной модели исключено уравнение энергии для ТПЖ и изоляции и добавлено для монолитной конструкции (таблица).

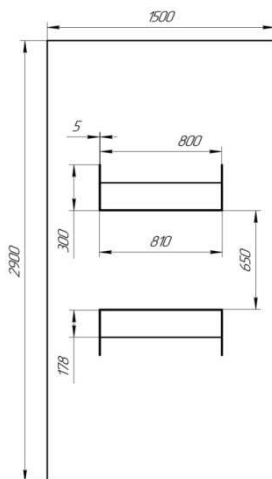


Рис. 2. Модель 2. Упрощенная модель

Эквивалентные свойства монолитной плиты

Свойства	Плотность, кг/м ³	Удельная теплоемкость, Дж/кг·°C	Теплопроводность, Вт/м·°C
Величина	1645	2336	79

В результате численных расчетов было получено распределение максимальных и минимальных значений температуры во времени для разных моделей (рис. 3).

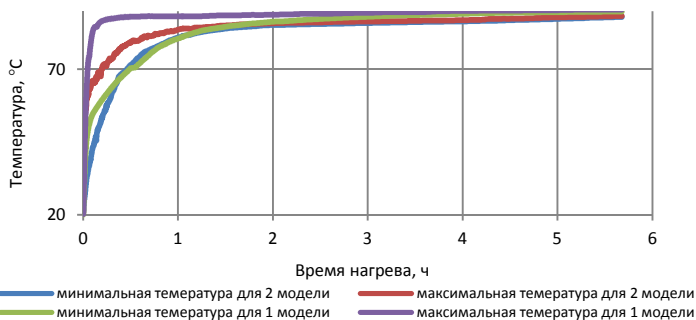


Рис. 3. График зависимости температуры нагрева от времени для 1-й и 2-й модели

Из графика (см. рис. 3) видно, что при нагреве первые 30 мин минимальные значения температуры ТПЖ отличаются на 10 градусов,

отличие составляет 16 %, а далее, после 2 ч, значения отличаются не более чем на 1 градус, отличие составляет 1 %. Для максимальных значений первые 30 мин температуры ТПЖ отличаются на 15 градусов, отличие составляет 18 %, а далее, после 2 ч, отличаются не более чем на 1 градус, отличие составляет 1 %. Отсюда можно сделать вывод, что замена первой модели на вторую допустима, так как значения температуры после 2 ч нагрева отличаются на 1 %.

В работе были разработаны две математические модели процесса тепломассопереноса в ванне с кабелем с силаносшиваемой изоляцией, намотанным на барабан. Анализ полученных распределений значений температуры показал, что при данных условиях кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена прогревается за 2 ч и модель может быть заменена на упрощенную. Результат данной работы может использоваться при создании технологических режимов сшивки силановой изоляции.

Библиографический список

1. Баочжун Х. Моделирование свойств сшитого полиэтилена // Актуальные проблемы современной науки. – 2005. – № 5.
2. ГОСТ Р 55025–2012. Кабели силовые с пластмассовой изоляцией на номинальное напряжение от 6 до 35 кВ включительно.
3. Навалихина Е.Ю., Труфанова Н.М. Управление токовой нагрузкой линий в кабельном канале с учетом сложного теплообмена // Известия Самар. науч. центра Рос. акад. наук. – 2012. – Т. 14, № 4(5). – С. 1318–1321.

Сведения об авторах

Гольцов Евгений Сергеевич – студент Пермского национально-го исследовательского политехнического университета, гр. МЭ-15-16, 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 кафедрой «Конструирование и технологии в электротехнике» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: trufanova@pstu.ru

Д.А. Сицилицин, А.В. Ромодин

МЕТОДИКА ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ НЕФТЕСКВАЖИН ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ»

Приведена методика, позволяющая анализировать электропотребление нефтескважины в эксплуатационных условиях, имея при этом только ключевые параметры скважины.

Ключевые слова: энергетическая эффективность, электропотребление, статистический анализ.

D.A. Sitsilitsin, A.V. Romodin

METHODS OF EXPRESS ANALYSIS OF POWER CONSUMPTION OF OIL WELLS LLC LUKOIL-PERM

This article presents a technique that allows analyzing the power consumption of oil wells in operating conditions while having only the key parameters of the well.

Keywords: energy efficiency, power consumption, statistical analysis.

Проблема энергетической эффективности является актуальной проблемой нефтяной отрасли. В настоящее время эксплуатация добывающих скважин в России осуществляется в основном с помощью УЭЦН – 60 % всего фонда, и эта доля постоянно растет. Основными преимуществами УЭЦН являются широкий модельный ряд и возможность создания высокой депрессии за счет высоких напоров и больших глубин спуска. Для части добывающего фонда этот способ эксплуатации является практически безальтернативным [1]. УЭЦН имеет существенный недостаток, который обусловлен конструктивной особенностью, – низкий КПД. Это характерно для малопроизводительных УЭЦН с номинальной подачей в диапазоне 10–35 м³/сут. Данная особенность УЭЦН была отмечена в работе [2]. По выводам ее авторов, коэффициент полезного действия УЭЦН в области небольших подач резко снижается. К аналогичному выводу пришли авторы работы [3, с. 7, 10–14]. В итоге малый КПД. Низкопроизводительность УЭЦН формирует высокие удельные энергозатраты. Программа повышения энергетической эффективности состоит из семи основных мероприятий: выполнение энергоэффективного дизайна; применение ПЭД с повышенным номинальным напряжением; применение УЭЦН

с высоким КПД; энергоэффективные мероприятия на фонде УСШН; замена ПЭД на ВЭД; оптимизация наземного оборудования УЭЦН; перевод УЭЦН в псевдо-постоянный режим работы.

По данным, отмеченным в работе [4], наибольшее влияние на электропотребление оказывает энергосберегающий дизайн (ЭСД), который основан на правильной организации производства и четкой дисциплине. Все упомянутые мероприятия основываются на известных данных электропотребления. В данном случае не учитывается технологический процесс, который оказывает сильное влияние на все параметры системы, в том числе и на электропотребление, а также возможная неполнота данных.

В данной работе представляется методика определения места замера электропотребления УЭЦН. С помощью данной методики представляется возможность определить типовую скважину, где нужно произвести измерение параметров, влияющих на электропотребление (динамический уровень жидкости, фактический дебит жидкости) [5], и предположить, что на похожих УЭЦН данные параметры будут такие же, поэтому отпадает необходимость знать большое количество технологических факторов, тем более значение большого количества параметров в эксплуатационных условиях тяжело измерить.

В основе разрабатываемой методики лежат теоретические представления о математическом и статистическом анализе данных. Данный способ предназначен для описания последовательности действий по проверке возможности определения ключевых факторов, влияющих на электропотребление УЭЦН, и нахождения типового места измерения электропотребления с целью повышения энергоэффективности. В итоге все сводится к тому, что на основе данных формируются кластеры и в каждом кластере выбирается типовая точка, по которой можно произвести оценку энергоэффективности. Методика состоит из нескольких основных процедур: подготовка исходной информации; определение параметров, которые имеют самый высокий весовой коэффициент; кластерный анализ данных и выбор типовой точки измерения электропотребления; вывод о влиянии определенных параметров на электропотребление.

Порядок работы. В подготовку исходной информации входят все параметры, описывающие группу скважин, а именно: цех добычи нефти и газа, дожимная насосная станция, забойное давление, пластовое давление, буферное давление, линейное давление, затрубное давление, депрессия пласта, затрубное статистическое давление, динамический

уровень жидкости, статический уровень жидкости, фактический дебит жидкости, фактический процент воды, плотность воды, плотность нефти, производительность насоса, глубина спуска насоса, скорость вращения насоса, $K_{\text{под}}$ насоса, номинальная подача насоса, КПД насоса, мощность насоса, полезная мощность насоса, мощность ПЭД; мощность, потребляемая УЭЦН; удельное электропотребление, наработка скважины, потери активной мощности в кабельной линии.

Определение параметров, имеющих самый большой весовой коэффициент, производится с помощью метода главных компонент в программе RStudio. Поскольку все параметры имеют разные единицы измерения, применять метод главных компонент без стандартизации переменных неразумно, потому что главная задача состоит в том, чтобы выявить переменные, которые наиболее информативно описывают разницу между нефтяными скважинами. После стандартизации данных применяется метод главных компонент с помощью программного кода (рис. 1).

```
setwd("E:/Program Files/R")
n1<-read_excel(paste("E:/Program Files/R/Primer6.xlsx", sep = ""))
n1 <- f(n1)
g(n1)
glimpse(n1)
n1<-select(n1,-цднг)
n1<-select(n1,-Месторождение,-днс)
n1<-select(n1,-Номер)
describe(n1)
cor(n1)
n1.pca<-prcomp(n1,scale=TRUE )
pca1 <- n1.pca$x[, 1]
v1 <- n1.pca$rotation[, 1]
v1
head(pca1)
summary(n1.pca)
plot(n1.pca)
biplot(n1.pca, xlim = c(-0.3, 0.3))
v1<-data.frame(n1.pca$rotation[,1])
v1
plot(n1.pca)
class(n1.pca)

n1.pca1<-prcomp(n1,scale=TRUE )
pca2 <- n1.pca1$x[, 1]
v1 <- n1.pca1$rotation[, 1]
v1
```

Рис. 1. Программный код метода главных компонент

Весовой коэффициент – это результат старого параметра, с которым он входит в новую синтетическую переменную. В проделанной работе наибольший вес имеют такие параметры, как динамический уровень жидкости, фактический дебит жидкости и мощность ПЭД. Эти параметры подтверждаются статистическим анализом [1], на основании которого была выявлена прямо пропорциональная зависимость между мощностью, которая затрачивается на подъем жидкости, и подачей жидкости. Если в ходе определения весовых коэффициентов

получились параметры не такие, как в проделанной работе, то можно с помощью кластерного анализа проанализировать другие зависимости.

Реализация кластерного анализа происходит в программе RStudio с загруженными статистическими библиотеками, а именно: readxl, ggplot2, stringr, caret, forecast, lubridate, TTR, fpp2, TSA. Для реализации кластерного анализа используется метод DBSCAN, так как у него есть преимущества перед другими методами, а именно, данный алгоритм не имеет в себе установки разделить данные на кластеры одинакового размера и может распознавать кластеры различной формы. Далее нужно выполнить программный код (рис. 2), с помощью которого все исследуемые данные разделятся на кластеры и тем самым образуют диаграмму рассеивания (рис. 3).

```
setwd("E:/Program Files/R")
tab0<-read_excel(paste("E:/Program Files/R/Primer6.xlsx", sep = ""))
tab011<-tab0[,c(12,14,27)]
maxs<-apply(tab011, 2, max)
mins<-apply(tab011, 2, min)
tab01<-scale(tab011, center = mins,
              scale = maxs-mins)
par(mfrow = c(1,1))
tab001<-dbscan(tab011, eps = 0.093, minpts = 2)
plot(tab01$Мощность.ПЭД.кВт,
      tab01$Ндин.м,
      col = tab001$cluster+2,
      pch = tab001$cluster+14, cex = 2,
      xlab = "Мощность ПЭД, кВт", ylab = "Ндин, м")
plot(tab011$Мощность.ПЭД.кВт,
      tab011$Qж.факт.м3.сут,
      col = tab001$cluster+1,
      pch = tab001$cluster+14, cex = 2,
      xlab = "Мощность ПЭД, кВт",
      ylab = "Qж факт, м3/сут ")
plot(tab0, tab011)
H<-tab01$Ндин.м
Q<-tab01$Qж.факт.м3.сут
P<-tab01$Мощность.ПЭД.кВт
plot3d(H, Q, P, col = tab001$cluster+1, size = 5)
```

Рис. 2. Программный код кластеризации методом DBSCAN

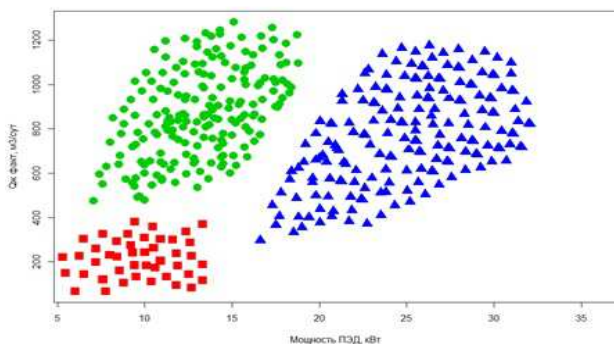


Рис. 3. Диаграмма рассеяния динамического уровня от мощности ПЭД

Далее из каждой области рассеивания визуально определяется любая из точек и уточняется ее числовое значение в функциях f – фактический дебит жидкости от мощности ПЭД и f_1 – динамический уровень жидкости от мощности ПЭД. На основании значения выбранной точки делается предположение о значимости влияния данных параметров на режимы электропотребления нефтяной скважины. С помощью проделанных операций можно сделать вывод о влиянии определенных параметров (в работе рассмотрено влияние таких параметров, как динамический уровень жидкости, фактический дебит жидкости и мощность ПЭД) на энергетическую эффективность. Определение и распределение данных величин позволит уменьшить количество измеряемых технологических параметров, а впоследствии сделать прогноз электропотребления.

Библиографический список

1. Тарасов В.И., Каверин М.Н., Якимов С.Б. Сравнение энергопотребления при различных способах механизированной добычи по ряду предприятий ОАО «НК «Роснефть»» // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2012. – № 3. – С. 49–52.
2. Ивановский В.Н., Дарищев В.И., Сабиров А.А. Скважинные насосные установки для добычи нефти / РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. – М.: Нефть и газ, 2002. – С. 7.
3. Мищенко И.Т., Бравичева Т.Б., Ермолаев А.И. Выбор способа эксплуатации скважин нефтяных месторождений с трудноизвлекаемыми запасами. – М.: Недра, 2005. – 448 с.
4. Реализация проекта энергосбережения при механизированной добыче в ОАО «Самотлорнефтегаз» / С.Д. Шевченко, И.Я. Чудийович, М.Н. Каверин, В.П. Тарасов // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2013. – № 6. – С. 40–45.

Сведения об авторах

Сицилицин Дмитрий Александрович – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ЭС-15-16, г. Пермь, e-mail: dsitsilitsin@gmail.com

Ромодин Александр Вячеславович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации системы» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: romodin@msa.pstu.ru.

Секция IV
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

С.В. Говорливых, С.А. Тюрин

РАДИОИНТЕРФЕЙС 5G NR: ТЕХНОЛОГИИ И ПРИНЦИП РАБОТЫ

Приведены технологии, определяющие новый радиointерфейс на физическом уровне в сетях пятого поколения, и принцип их работы.

Ключевые слова: мобильные сети, 5G NR, 5G New Radio, сети пятого поколения.

S.V. Govorlivykh, S.A. Tyurin

RADIO INTERFACE 5G NR: TECHNOLOGIES AND OPERATING PRINCIPLE

This article presents the technologies that define the new radio interface at the physical level in the networks of the fifth generation and the principle of their work.

Keywords: mobile networks, 5G NR, 5G New Radio, networks of the fifth generation.

Сети 5G приходят на смену мобильным сетям четвертого поколения 4G LTE, сети 5G получили развитие по трем основным направлениям: сверхширокополосный мобильный доступ (enhanced Mobile Broadband, eMBB), надежная связь с низкими задержками (Ultra-Reliable and Low Latency Communications, URLLC), массовое подключение различных датчиков и устройств (massive Machine Type Communications, mMTC).

Рекомендация 3GPP TR 38.913 определяет следующие ключевые показатели сетей 5G:

- пиковая скорость передачи данных на линии вниз (Downlink) 20 Гбит/с (спектральная эффективность 30 бит/с/Гц);
- пиковая скорость передачи данных на линии вверх (Uplink) 10 Гбит/с (спектральная эффективность 15 бит/с/Гц);
- минимальная задержка в подсистеме радиодоступа для сервисов URLLC – 1 мс, для сервисов eMBB – 4 мс;
- максимальная плотность подключенных к сети в городских условиях устройств из мира «Интернет вещей» – 1000 000 устройств/км²;

Беспроводные технологии, определяющие спецификацию 5G NR. В релизе 15 3GPP было решено, что в качестве нового радиointерфейса будет использован 5G NR(New Radio), также были определены технологии физического уровня, они показаны на рис. 1.

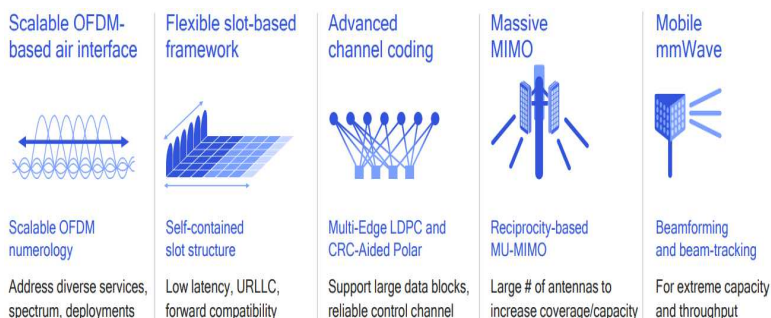


Рис. 1. Технологии физического уровня 5G NR

Модуляция. 5G NR имеет модуляцию CP-OFDM (OFDM с циклическим префиксом), которая используется в нисходящем (DL) и восходящем (UL) каналах связи. Модуляция CP-OFDM широко применяется для передачи в DL, но для передачи в мобильных UL она еще не использовалась. Имея одинаковую модуляцию в UL и DL, можно обеспечить связь между устройствами в будущих релизах.

Разнесение поднесущих больше не имеет фиксированного значения 15 кГц, как было в 4G, теперь разнесение имеет переменное значение, для этого ввели понятие нумерологии (μ). Разнесение определяется формулой $2\mu \cdot 15$ кГц.

Фреймовая структура (Frame/Subframe/Slot) показана на рис. 2.

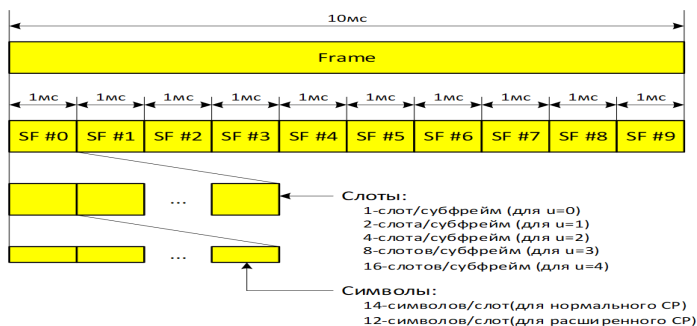


Рис. 2. Структура кадра OFDM

В системе OFDM циклический префикс (CP) используется для ослабления влияния разброса задержки и межсимвольных помех. CP добавляется в начало каждого OFDM-символа (рис. 3) и представляет собой циклическое повторение окончания символа. Наличие циклического префикса создает временные паузы между отдельными символами, и если длительность защитного интервала превышает максимальное время задержки сигнала в результате многолучевого распространения, то межсимвольной интерференции не возникает.

Высоконадежная связь с низкими задержками (URLLC) обеспечивается частично с помощью мини-слотов. В LTE передача осуществляется в слотах стандартной длительности, использование которых не может максимально снизить задержки. Мини-слот короче стандартного и может располагаться в любом месте внутри стандартного слота. В мини-слоте помещается 2, 4 или 7 символов OFDM. Мини-слоты позволяют увеличить полезный объем передаваемой информации с низкой задержкой, поскольку передача запускается немедленно, не ожидая начала очередного стандартного слота (рис. 4).

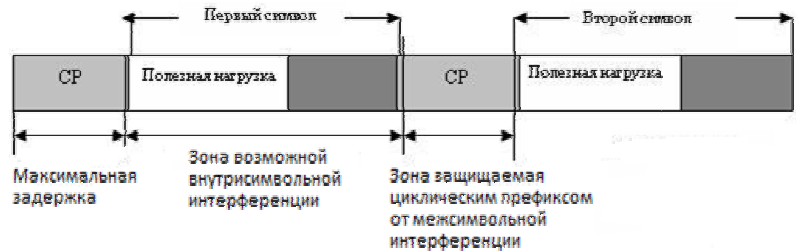


Рис. 3. Защита от межсимвольной интерференции с помощью CP

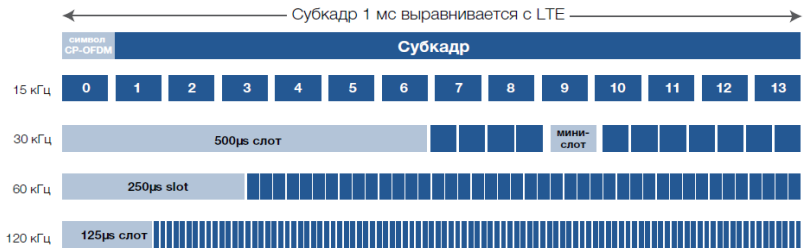


Рис. 4. Слоты, мини-слоты и соответствующие значения длительности слотов внутри субкадра

Частотный спектр стандарта 5G (рис. 5). Стандарт 5G NR регламентирует использование частот до 52,6 ГГц, а в последующих релизах 3GPP планируется расширить до 100 ГГц.

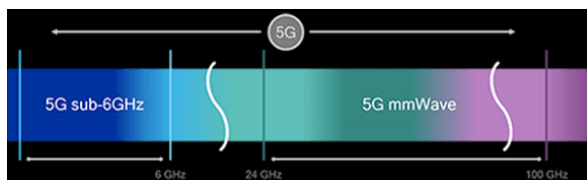


Рис. 5. Частотный спектр 5G

В диапазоне до 1 ГГц частоты 600, 700 и 800 МГц будут задействованы для нужд устройств интернета вещей (IoT). Диапазон 1–6 ГГц будет использоваться для увеличения зон покрытия и пропускной способности сетей. Диапазон свыше 6 ГГц будет задействован для тех случаев, когда требуются очень широкополосные сигналы (3D-видео, дополненная реальность, облачные сервисы).

Кодирование. В сетях 5G используются две основные схемы кодирования. Для кодирования блоков управляющей информации DCI, UCI – полярные коды (polar coding). Для кодирования транспортных каналов BCH, PCH, DL-SCH, UL-SCH – коды с малой плотностью проверки на четность – LDPC (Low Density Parity Check Codes). Коды LDPC характеризуются сравнительно высокой скоростью декодирования, что и обусловило их выбор для использования на высокоскоростных трафиковых каналах сетей 5G. Коды LDPC пришли на смену turbo-кодерам, используемым для кодирования трафиковых каналов в сетях 4G-LTE. Это обусловлено в основном тем обстоятельством, что turbo-декодеры по сравнению с LDPC имеют более высокую сложность реализации декодера и более низкую скорость его работы. Кроме того, LDPC позволяет использовать более низкоскоростные схемы кодирования и, следовательно, обладает большими возможностями по восстановлению искаженных сигналов. Полярные коды, применяемые для кодирования блоков управляющей информации, в теории позволяют достичь предела Шеннона на длинах кодового блока $N \rightarrow \infty$ при сложности кодирования и декодирования $\sim \log N$.

Massive MIMO. Одним из ключевых нововведений в технологии 5G является использование массивных многоантенных систем (Massive Multiple-Input-Multiple-Output), под которыми принято понимать системы, имеющие более восьми управляемых антенн и приемо-

передающих трактов. Использование Massive MIMO позволяет с одной стороны увеличить емкость сети (в 5G NR доступное кол-во параллельных пространственных потоков данных в нисходящем канале DL – 8; в восходящем UL – 4), с другой – повысить помехоустойчивость за счет использования техники формирования направленных лучей (beamforming). Для передачи информации на одном частотном канале используется несколько передатчиков и антенн для отправки различных потоков.

В 5G NR регламентировано до 256 антенных элементов в массиве. На рис. 6 показано сравнение типичной соты MIMO 4G с массивной сотой MIMO 5G, которая оснащена намного большим количеством антенн. Массивная базовая станция MIMO 5G, оснащенная гораздо большим количеством антенн, сможет обслуживать гораздо больше устройств, как это предусмотрено вариантом использования 5G IoT и другими.

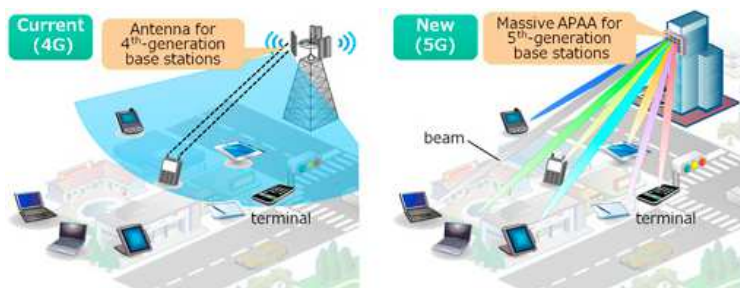


Рис. 6. Соты MIMO 4G и mMIMO 5G

В Massive MIMO множество передатчиков на БС используются для формирования многолучевой диаграммы направленности антенны, но поскольку на абонентском устройстве по-прежнему только две антенны, то в режиме передачи остается 2×2 или 4×4 для «продвинутых терминалов» с четырьмя антеннами.

Формирование луча (beamforming). В 5G исследователи предложили гибридное формирование луча (цифровое и аналоговое, в LTE было только цифровое), чтобы позволить gNB 5G поддерживать большое количество антенн при одновременном снижении затрат на реализацию MU-MIMO. На рис. 7 показана гибридная система с общей стадией обработки в основной полосе (составляет матрицу пространственных подканалов).

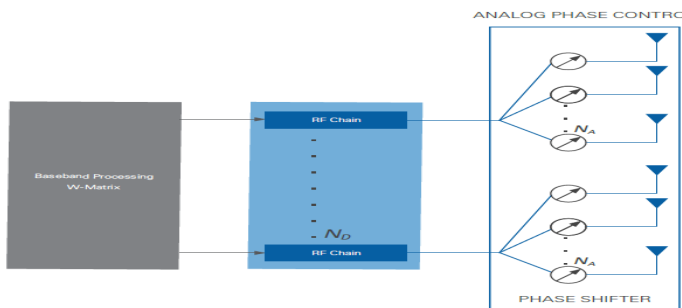


Рис. 7. Гибридная система с общей стадией обработки в основной полосе (составляет матрицу пространственных подканалов)

Гибридная система с общей стадией обработки подает несколько потоков данных в соответствующие им РЧ-цепочки. Эти потоки подвергаются цифровой обработке сигналов формирования диаграммы направленности, прежде чем перейти к аналоговой стадии. На этом последнем этапе система применяет управление лучом с аналоговыми фазовращателями, которые фокусируют луч в определенном направлении. Это приводит к пространственно мультиплексированным РЧ-потокам, содержащимся в направленном луче.

В статье рассмотрены основные технологии физического уровня 5G NR, также показан общий принцип их работы. Сети 5G планируется запустить на коммерческой основе в 2020 г., и это будет большим прорывом в развитии беспроводных сетей.

Библиографический список

1. Технологии связи [Электронный ресурс]. – URL: <https://itecinfo.ru/content/сеть-радиодоступа-5g-часть-2> (дата обращения: 15.01.2019).
2. National Instruments. – URL: <http://www.ni.com/white-paper/52382/en/> (accessed 15 January 2019).

Сведения об авторах

Говорливых Сергей Викторович – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ТКЗ-17-1м, г. Пермь, e-mail: gornaz90@mail.ru

Тюрин Сергей Александрович – старший преподаватель кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: tiurinsa@yandex.ru

В.В. Костарев, С.А. Тюрин

ОБЗОР И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ LORAWAN И NB-IOT

Рассмотрены две основные технологии для передачи небольших по объему данных на дальние расстояния, применяемые в распределенных сетях телеметрии, межмашинного взаимодействия и интернета вещей. Проведен сравнительный анализ технических характеристик данных технологий.

Ключевые слова: интернет вещей, беспроводные сети, LPWAN, IoT, LoRaWAN, NB-IoT.

V.V. Kostarev, S.A. Tyurin

OVERVIEW AND COMPARATIVE ANALYSIS OF NETWORK TECHNOLOGIES BY LORAWAN AND NB-IOT

This article discusses the two main technologies for transferring small amounts of data over long distances used in distributed networks of telemetry, machine-to-machine interaction and the Internet of things. A comparative analysis of the technical characteristics of these technologies.

Keywords: Internet of Things, wireless networks, LPWAN, IoT, LoRaWAN, NB-IoT.

К 2020 г. более 25 млрд устройств будут подключены с помощью беспроводной связи. В связи с быстрым ростом рынка интернета вещей (IoT) технологии Low power wide area (LPWA) приобрели популярность. В различных областях применения (NB)-IoT и long range (LoRa) являются двумя ведущими технологиями. В этой статье мы представим всесторонний обзор NB-IoT и LoRa как эффективные решения подключения устройств. Показано, что нелицензированная LoRa имеет преимущества по сроку службы, емкости и стоимости батареи. Между тем лицензированный NB-IoT предлагает преимущества, оперируя понятиями QoS, латентности, надежности [1].

Технология LoRaWAN. Сама модуляция LoRa принадлежит к физическому уровню (слою) PHY, поэтому может использоваться в любых топологиях. Возможность использования ячеистой (Mesh) сети позволяет расширить зону доступа, но это происходит за счет

понижения пропускной способности узлов. Данная топология требует дополнительной синхронизации, а также влечет за собой резкое возрастание потребления электроэнергии за счет постоянных прыжков по частотам и синхронизации. Исходя из этого, если нет объективных причин использовать ячеистую топологию, целесообразнее будет применять радиальную архитектуру типа звезда. Это позволит оптимизировать пропускную способность сети и снизить энергопотребление, а также упростит развертывание данной сети.

LoRaWAN может одновременно обслуживать сразу три класса устройств A, B, C. Деление на классы производится для формирования расписания передачи данных.

LoRaWAN использует нелицензируемый диапазон частот, что позволяет предприятиям и производствам легко и дешево создавать сети и подсети IoT с LoRa, например для реализации проектов «умное производство», и одновременно использовать мобильную сеть для контроля за работой объекта дистанционно.

LoRa наиболее применима для датчиков и устройств, которые имеют низкую скорость передачи данных и длительный период между передаваемыми пакетами данных.

Стоимость комплекта модулей LoRaWAN в среднем составляет сумму около 600 руб., в то время как модули LTE, такие как NB-IoT, стоят около 1500 руб. за комплект. Если учесть ценообразование на комплекты данных устройств, сеть на основе LoRaWAN развернуть в разы дешевле и проще, чем сети на основе технологии LTE [2].

Технология NB-IoT. Технологии для связи между устройствами развиваются очень быстро. В последнее время отмечается огромный интерес к решениям и технологиям, позволяющим объединять в одну сеть датчики, провода, счетчики (воды, газа, электричества), автомобили, бытовую технику.

Таким образом, решения на базе интернета вещей (IoT) постоянно создаются и расширяются. IoT состоит из ряда сетей, которые могут иметь разные цели и топологии. Некоторые сети охватывают местную территорию (например, один дом), тогда как другие предлагают широкое покрытие. Широкое покрытие рассматривается в Партнерском проекте 3-го поколения (3GPP). С учетом важности IoT 3GPP представила

ряд ключевых функций для IoT в его последнем выпуске – Rel-13. ЕС-GSM-IoT и LTE-MTC направлены на улучшение существующих глобальных систем мобильной связи (GSM) и сетей долгосрочного развития (LTE). Применение LTE позволяет расширить покрытие, снизить сложность развертывания сети, увеличить время автономной работы и обратную связь. Кроме того, NB-IoT имеет гибкость развертывания, позволяющую оператору внедрять NB-IoT, используя небольшую часть своего существующего доступного спектра [3].

NB-IoT требует минимальной полосы пропускания системы в 180 кГц для нисходящей линии связи и восходящей линии связи соответственно. Оператор связи, использующий GSM, может заменить одну несущую GSM (200 кГц) NB-IoT. Оператор LTE может развернуть NB-IoT внутри LTE несущей путем выделения одного из блоков физических ресурсов (PRB).

Радиоинтерфейс NB-IoT оптимизирован для обеспечения гармоничного сосуществования с LTE. Таким образом, такое «внутриполосное» развертывание NB-IoT внутри несущей LTE не будет снижать производительность LTE или NB-IoT. Оператор, использующий технологию LTE, имеет возможность развертывания NB-IoT в защитной полосе, несущей LTE.

NB-IoT лучше всего применять в городских условиях. На данный момент времени производительность сети избыточна для применения в районах сельской местности.

Технология NB-IoT позволяет обеспечить значительное покрытие сети, обладает низкой сложностью устройств, длительным временем автономной работы и возможностью поддержки огромного количества устройств IoT. NB-IoT также обладает простой интеграцией и обменом радиоресурсами с существующими сетями GSM и LTE.

В дальнейшем планируется улучшение технологии NB-IoT, включая введение многоадресной функциональности, повышение точности позиционирования, что важно для многих приложений и устройств IoT.

Сравнение технологий LoRaWAN и NB-IoT. Сравнение данных технологий представлено в таблице.

Сравнение характеристик технологий LoRaWAN и NB-IoT

Характеристика	NB-IoT	LoRa
Метод модуляции	BPSK и QPSK	DSSS
Диапазон	1–5, 8, 11–14, 17–21, 25, 26, 28, 31, 66, 70, 71, 72, 74 [4]	ISM
Ширина полосы канала передающего устройства	180 кГц	125 кГц
Эффективность использования спектра	Высокая	Низкая
Скорость передачи данных	200 кбит/с	0,3–11 кбит/с
Частота	617–960 МГц, 1420–2020 МГц	868,8 МГц
Шифрование	128-EEA1-2, 128-EIA1-2	AES128
Дальность	До 1,5 км в городе	До 2,5 км в городе

Согласно проведенному сравнительному анализу LoRa и NB-IoT имеют свои достоинства и недостатки. По большинству критериев, таких как простота развертывания, возможность применения, время автономной работы, применение в частных сетях, стоимость развертывания, LoRaWAN имеет преимущества перед NB-IoT, однако NB-IoT является наиболее перспективной с точки зрения качества, безопасности и гарантированности сервиса за счет использования лицензируемого спектра и алгоритмов защиты данных LTE, предоставляющих услуги на базе сетей LTE [4].

Кроме того, технология NB-IoT более универсальна, что позволяет реализовывать всевозможные IoT сценарии, в том числе критичные к задержке и скорости передачи данных. В итоге обе технологии эффективны в рамках использования в сетях IoT. Выбор в пользу той или иной технологии необходимо делать исходя из заданных заказчиком требований и условий, в которых будет разворачиваться данная сеть.

Библиографический список

1. Верхулевский К. LoRa – все, что вы хотели знать об этом // Компоненты и технологии. – 2016. – № 3. – С. 90–94.
2. NB-IoT vs LoRaWAN. Раунд 2 [Электронный ресурс]. – URL: <https://iot.ru/promyshlennost/nb-iot-vs-lorawan-raund-2> (дата обращения: 15.05.2019).

3. Рыжков А.Е. Развитие технологии NB-IoT // Труды учебных заведений связи. – 2017. – Т. 3, № 4. – С. 94–101.

4. 3GPP TS 36.101 V15.0. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA). User Equipment (UE) radio transmission and reception. – 2017. – 1547 p.

Сведения об авторах

Костарев Виталий Викторович – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ТК3-17-1м, г. Пермь, e-mail: kostarevv.v@yandex.ru

Тюрин Сергей Александрович – старший преподаватель кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: tiurinsa@yandex.ru

Д.А. Дубовцева, В.И. Фрейман

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ ТУРБОКОДИРОВАНИЯ В ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Рассмотрены принципы турбокодирования, приведены основные параметры турбокодов, влияющие на результат декодирования. Рассмотрена модель инфокоммуникационной системы с использованием турбокодов. Исследована зависимость показателей достоверности инфокоммуникационных систем от параметров турбокодов и свойств среды передачи.

Ключевые слова: турбокод, помехоустойчивое кодирование.

D.A. Dubovceva, V.I. Freyman

RESEARCH OF METHODS AND ALGORITHMS OF TURBO CODING IN INFOCOMMUNICATION SYSTEMS

In this article principles of turbo coding were considered, presents the main parameters of the turbo codes that affect the decoding result. The model of the infocommunication system using turbo codes was considered. The dependence of reliability indicators of infocommunication systems on the parameters of turbo codes and properties of the transmission medium was researched.

Keywords: turbocode, error correcting coding.

Помехоустойчивое кодирование является неотъемлемой частью любой инфокоммуникационной системы. Один из видов помехоустойчивых кодов – турбокоды. Они позволяют повысить надежность передачи при низких значениях отношения энергии сигнала E_b , приходящейся на 1 бит, к энергетической спектральной плотности шума (N_0). Другими словами, турбокоды эффективны в каналах связи с шумами, поэтому такие коды используются в беспроводной связи.

Объектом исследования являются методы турбокодирования, предметом исследования являются зависимости показателей достоверности инфокоммуникационных систем от параметров турбокодов и свойств среды передачи.

Цели статьи – ознакомление с принципом работы турбокодов, определение параметров, влияющих на эффективность турбокодов, и исследование влияния этих параметров на конечный результат декодирования.

На основе проведенных исследований будут разработаны основные положения методических указаний к лабораторной работе. Учебно-лабораторная база является важным фактором оценки качества образования в вузах [5, 6].

Параметры, влияющие на эффективность турбокодов: количество итераций декодирования, алгоритм декодирования составляющих кодов, тип перемежителя, задающий полином, полином обратной связи составного сверточного кода и его конструктивная длина. Также имеет значение длина последовательности, поступающей на вход кодера, поскольку от нее зависит длина перемежителя и, следовательно, качество перераспределения битов.

Рассмотрим принцип работы кодера турбокода, схема которого показана на рис. 1. Здесь X_k – информационные биты, Z_k – проверочные биты с первого составного кодера и Z'_k – проверочные биты со второго составного кодера, X'_k – перемеженные информационные биты. Например, для длины входной последовательности 64 бит выходная последовательность состоит из трех чередующихся 64-битовых потоков X_k , Z_k и Z'_k [1]. Поток X'_k не используется, так как закон перемежения известен на принимающей стороне.

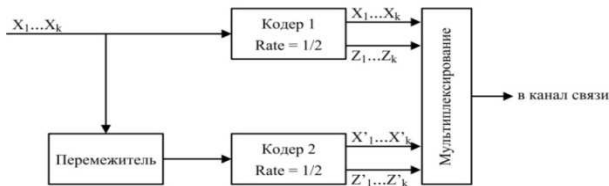


Рис. 1. Схема кодера турбокода

В турбокодер добавляется схема перевода составляющих кодеров в нулевое состояние для повышения эффективности декодирования. При этом на вход каждого из кодеров поступают биты из ветви обратной связи. В канал связи отправляются хвостовые биты (биты из обратной связи и проверочные к ним) [2]. Причем для перевода в нулевое состояние составляющих кодеров потребуются разные хвостовые биты, так как в схеме есть перемежитель. Хвостовые биты добавляются в конце, по t бит от каждого составного кодера $X'_{k+i}Z_{k+i}$ и $X'_{k+i}Z'_{k+i}$ ($i = 1 \dots t$) [3].

Таким образом, переданная последовательность будет иметь следующий вид: $X_1Z_1Z'_1$, $X_2Z_2Z'_2$, ..., $X_kZ_kZ'_k$, $X_{k+1}Z_{k+1}$, ..., $X_{k+t}Z_{k+t}$, $X'_{k+1}Z'_{k+1}$, ..., $X'_{k+i}Z'_{k+i}$.

Принятую последовательность для подачи на турбодекодер (рис. 2) необходимо разделить на две части. Для каждого составного декодера это: $X_1Z_1, \dots, X_kZ_k, X_{k+1}Z_{k+1}, \dots, X_{k+l}Z_{k+l}$ и $X'_1Z'_1, \dots, X'_kZ'_k, X'_{k+1}Z'_{k+1}, \dots, X'_{k+l}Z'_{k+l}$.

Здесь используются SISO (Soft Input Soft Output) составные декодеры. После нескольких итераций полученные «мягкие» решения приводятся к бинарному виду по схеме «жестких» решений.

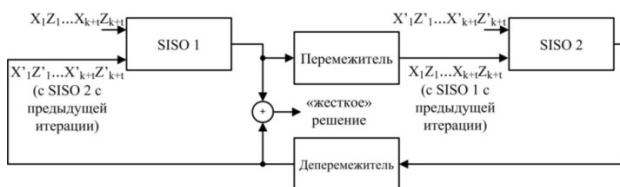


Рис. 2. Схема декодера турбокода

Чтобы исследовать влияние вышеперечисленных параметров на конечный результат декодирования, была построена модель инфокоммуникационной системы с AWGN с использованием турбокодирования (рис. 3) в среде MatLab/Simulink.

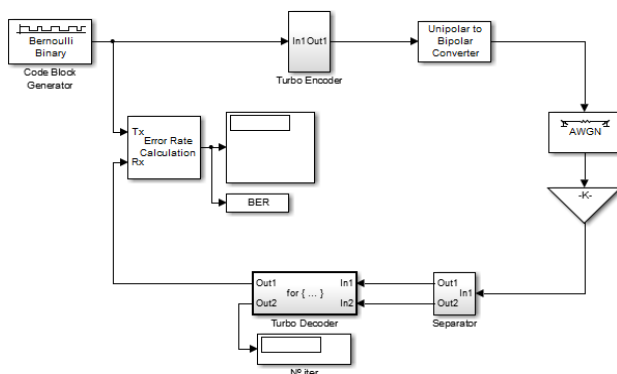


Рис. 3. Модель линии связи с использованием сверточного турбокода

За основу модели был взят демос-файл «commprccc.mdl». В нем были изменены турбокодер и турбодекодер: они составлены из простых блоков, что обеспечит гибкость и наглядность модели. Так, в составе турбокодера и турбодекодера имеется отдельный блок перемежителя, который можно заменить на необходимый. В рамках работы были рассмотрены QPP-перемежитель с квадратурными перестановками,

используемый в стандарте LTE [4], перемежитель типа random с заданными начальными значениями.

В то же время изменялись параметры составных сверточных кодов: конструктивная длина, задающий полином и полином обратной связи, алгоритмы декодирования. Для различной конструктивной длины требуется различное количество хвостовых битов – эта переменная должна учитываться. В исследовании производилось 10 экспериментов для различной последовательности на входе кодера турбокода, затем данные усреднялись. Различные последовательности были получены путем изменения начального состояния генератора Bernoulli Binary Generator. Для удобства был написан *m*-файл, с помощью которого задавались начальные значения, запускалась модель и производился сбор результатов в текстовый файл. Моделирование производилось методом Монте-Карло, для всех случаев использовался турбокод с кодовой скоростью $R = 1/3$, BPSK-модуляция.

Таблица 1

Значения параметров кодера и декодера турбокода

№ п/п	Длина вх. посл., бит	Тип перемеж.	Задающий полином	Полином ОС	Количество итераций	Алгоритм декодирования
1	2048	QPP	11	13	9	MAP
2						Max-log-MAP
3						Log-MAP
4			13	11	9	MAP
5						Max-log-MAP
6						Log-MAP
7			5	7	9	MAP
8						Max-log-MAP
9						Log-MAP
10			7	5	9	MAP
11						Max-log-MAP
12						Log-MAP
13		random	11	13	9	MAP
14						Max-log-MAP
15						Log-MAP
16			13	11	9	MAP
17						Max-log-MAP
18						Log-MAP
19			5	7	9	MAP
20						Max-log-MAP
21						Log-MAP
22			7	5	9	MAP
23						Max-log-MAP
24						Log-MAP

В процессе моделирования измерялся коэффициент ошибки BER в зависимости от соотношения E_b/N_0 . Критерий останова моделирования на основе максимального числа ошибочных битов (100) или максимального числа принятых битов (10^6), что дает точность измерений порядка 10^5 . Остальные параметры, при которых производились эксперименты, показаны в табл. 1. Для полиномов $g_0 = 5$, $g_1 = 7$ конструктивная длина $K = 3$, для полиномов $g_0 = 11$, $g_1 = 13$ – $K = 4$.

Рассмотрим примеры типов получившихся зависимостей коэффициента ошибок BER от E_b/N_0 . На рис. 4, *а* показана зависимость для эксперимента № 1 (см. табл. 1).

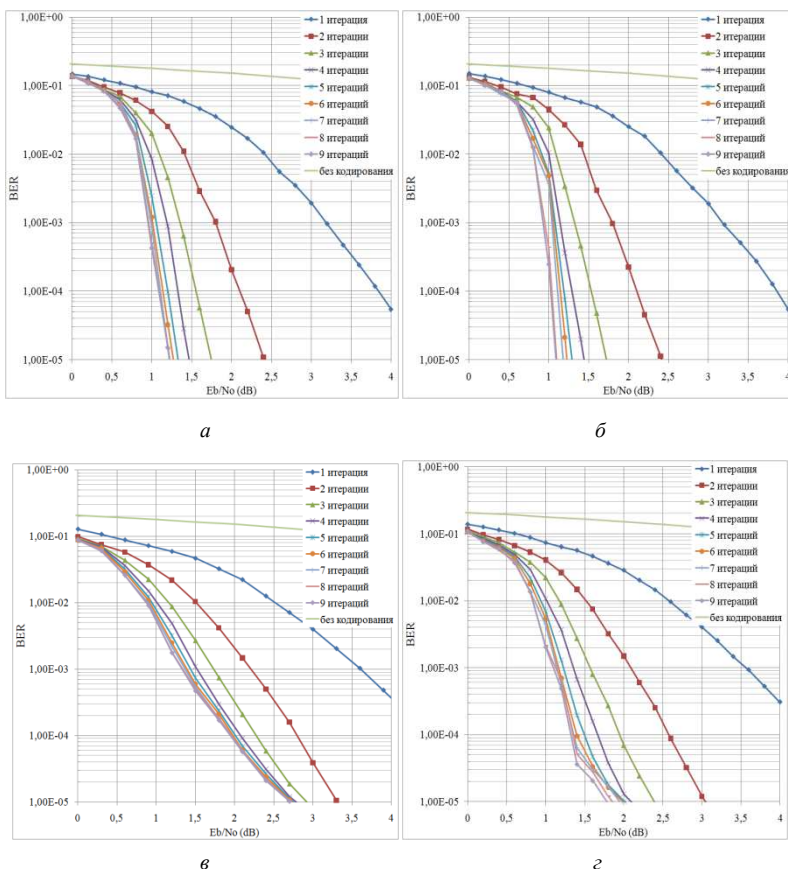


Рис. 4. Зависимость BER от E_b/N_0 : *а* – для эксперимента № 1; *б* – для эксперимента № 4; *в* – для эксперимента № 7; *г* – для эксперимента № 22

После пяти итераций коэффициент ошибок слабо меняется. На рис. 4, б показана зависимость для эксперимента № 4 (см. табл. 1). Слабое изменение коэффициента ошибок наблюдается после пяти итераций. На рис. 4, в показана зависимость для эксперимента № 7 (см. табл. 1). Здесь характер кривой отличается от предыдущих результатов, наблюдается медленное уменьшение коэффициента ошибок с ростом соотношения $E_b N_0$. Слабое изменение коэффициента ошибок наблюдается после 4–5 итераций. На рис. 4, г показана зависимость для эксперимента № 22 (см. табл. 1). Наблюдается начало участка насыщения кривой в области 1,4 дБ на высоких итерациях, что может говорить о неудачной конструкции перемежителя. После пяти итераций коэффициент ошибок меняется слабо.

В табл. 2 приведены значения коэффициента ошибок при различных итерациях декодирования.

Таблица 2

Значения коэффициента ошибок

№ п/п	$E_b N_0$, дБ	Количество итераций декодирования							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1	1,2	$7,14 \cdot 10^{-2}$	$2,54 \cdot 10^{-2}$	$4,58 \cdot 10^{-3}$	$8,83 \cdot 10^{-4}$	$9,61 \cdot 10^{-5}$	$3,23 \cdot 10^{-5}$	$1,52 \cdot 10^{-5}$	$1,42 \cdot 10^{-5}$
2	1,2	$6,76 \cdot 10^{-2}$	$3,29 \cdot 10^{-2}$	$1,25 \cdot 10^{-2}$	$4,30 \cdot 10^{-3}$	$1,36 \cdot 10^{-3}$	$8,49 \cdot 10^{-4}$	$4,95 \cdot 10^{-4}$	$3,75 \cdot 10^{-4}$
3	1,1	$7,43 \cdot 10^{-2}$	$3,40 \cdot 10^{-2}$	$9,19 \cdot 10^{-3}$	$2,06 \cdot 10^{-3}$	$8,68 \cdot 10^{-4}$	$2,22 \cdot 10^{-4}$	$4,07 \cdot 10^{-5}$	$2,73 \cdot 10^{-5}$
4	1,05	$7,67 \cdot 10^{-2}$	$3,98 \cdot 10^{-2}$	$1,85 \cdot 10^{-2}$	$6,99 \cdot 10^{-3}$	$3,08 \cdot 10^{-3}$	$2,34 \cdot 10^{-4}$	$1,26 \cdot 10^{-4}$	$7,67 \cdot 10^{-5}$
5	1,25	$6,58 \cdot 10^{-2}$	$3,07 \cdot 10^{-2}$	$1,00 \cdot 10^{-2}$	$1,86 \cdot 10^{-3}$	$3,86 \cdot 10^{-4}$	$9,55 \cdot 10^{-5}$	$5,26 \cdot 10^{-5}$	$1,78 \cdot 10^{-5}$
6	1,1	$7,31 \cdot 10^{-2}$	$3,58 \cdot 10^{-2}$	$1,43 \cdot 10^{-2}$	$1,54 \cdot 10^{-3}$	$3,25 \cdot 10^{-4}$	$1,41 \cdot 10^{-4}$	$5,91 \cdot 10^{-5}$	$4,00 \cdot 10^{-5}$
7	1,5	$4,66 \cdot 10^{-2}$	$1,04 \cdot 10^{-2}$	$2,71 \cdot 10^{-3}$	$1,09 \cdot 10^{-3}$	$7,35 \cdot 10^{-4}$	$5,97 \cdot 10^{-4}$	$5,43 \cdot 10^{-4}$	$4,95 \cdot 10^{-4}$
8	1,5	$4,44 \cdot 10^{-2}$	$1,11 \cdot 10^{-2}$	$3,43 \cdot 10^{-3}$	$1,39 \cdot 10^{-3}$	$9,14 \cdot 10^{-4}$	$6,99 \cdot 10^{-4}$	$6,17 \cdot 10^{-4}$	$5,30 \cdot 10^{-4}$
9	1,5	$4,73 \cdot 10^{-2}$	$1,02 \cdot 10^{-2}$	$2,67 \cdot 10^{-3}$	$1,07 \cdot 10^{-3}$	$7,36 \cdot 10^{-4}$	$6,08 \cdot 10^{-4}$	$5,45 \cdot 10^{-4}$	$4,89 \cdot 10^{-4}$
10	1,4	$5,90 \cdot 10^{-2}$	$1,61 \cdot 10^{-2}$	$2,36 \cdot 10^{-3}$	$4,51 \cdot 10^{-4}$	$1,49 \cdot 10^{-4}$	$4,95 \cdot 10^{-5}$	$3,33 \cdot 10^{-5}$	$1,92 \cdot 10^{-5}$
11	1,4	$5,91 \cdot 10^{-2}$	$2,00 \cdot 10^{-2}$	$4,60 \cdot 10^{-3}$	$8,30 \cdot 10^{-4}$	$2,98 \cdot 10^{-4}$	$1,07 \cdot 10^{-4}$	$5,14 \cdot 10^{-5}$	$3,27 \cdot 10^{-5}$
12	1,4	$5,97 \cdot 10^{-2}$	$1,58 \cdot 10^{-2}$	$2,40 \cdot 10^{-3}$	$4,64 \cdot 10^{-4}$	$1,55 \cdot 10^{-4}$	$5,00 \cdot 10^{-5}$	$3,21 \cdot 10^{-5}$	$2,06 \cdot 10^{-5}$
13	1,1	$7,19 \cdot 10^{-2}$	$3,64 \cdot 10^{-2}$	$1,58 \cdot 10^{-2}$	$4,62 \cdot 10^{-3}$	$1,12 \cdot 10^{-3}$	$3,35 \cdot 10^{-4}$	$1,75 \cdot 10^{-4}$	$1,24 \cdot 10^{-4}$
14	1,3	$6,13 \cdot 10^{-2}$	$2,77 \cdot 10^{-2}$	$7,62 \cdot 10^{-3}$	$5,94 \cdot 10^{-3}$	$3,59 \cdot 10^{-3}$	$8,83 \cdot 10^{-3}$	$4,19 \cdot 10^{-3}$	$1,72 \cdot 10^{-3}$
15	1,2	$6,52 \cdot 10^{-2}$	$2,89 \cdot 10^{-2}$	$6,38 \cdot 10^{-3}$	$9,84 \cdot 10^{-4}$	$1,40 \cdot 10^{-4}$	$3,41 \cdot 10^{-5}$	$1,78 \cdot 10^{-5}$	$1,26 \cdot 10^{-5}$
16	1,2	$6,54 \cdot 10^{-2}$	$2,60 \cdot 10^{-2}$	$5,65 \cdot 10^{-3}$	$4,99 \cdot 10^{-4}$	$1,59 \cdot 10^{-4}$	$3,46 \cdot 10^{-5}$	$2,11 \cdot 10^{-5}$	$1,51 \cdot 10^{-5}$
17	1,3	$6,35 \cdot 10^{-2}$	$2,49 \cdot 10^{-2}$	$6,85 \cdot 10^{-3}$	$7,09 \cdot 10^{-4}$	$1,82 \cdot 10^{-4}$	$5,29 \cdot 10^{-5}$	$2,54 \cdot 10^{-5}$	$1,59 \cdot 10^{-5}$
18	1,2	$6,65 \cdot 10^{-2}$	$2,66 \cdot 10^{-2}$	$6,14 \cdot 10^{-3}$	$5,19 \cdot 10^{-4}$	$1,74 \cdot 10^{-4}$	$3,13 \cdot 10^{-5}$	$2,13 \cdot 10^{-5}$	$1,58 \cdot 10^{-5}$
19	1,4	$5,18 \cdot 10^{-2}$	$1,36 \cdot 10^{-2}$	$3,45 \cdot 10^{-3}$	$1,72 \cdot 10^{-3}$	$1,04 \cdot 10^{-3}$	$7,52 \cdot 10^{-4}$	$7,06 \cdot 10^{-4}$	$6,69 \cdot 10^{-4}$
20	1,4	$5,18 \cdot 10^{-2}$	$1,63 \cdot 10^{-2}$	$4,49 \cdot 10^{-3}$	$2,16 \cdot 10^{-3}$	$1,31 \cdot 10^{-3}$	$8,75 \cdot 10^{-4}$	$8,05 \cdot 10^{-4}$	$7,60 \cdot 10^{-4}$
21	1,4	$5,19 \cdot 10^{-2}$	$1,39 \cdot 10^{-2}$	$3,52 \cdot 10^{-3}$	$1,71 \cdot 10^{-3}$	$1,04 \cdot 10^{-3}$	$7,85 \cdot 10^{-4}$	$6,91 \cdot 10^{-4}$	$6,53 \cdot 10^{-4}$
22	1,4	$5,63 \cdot 10^{-2}$	$1,48 \cdot 10^{-2}$	$2,75 \cdot 10^{-3}$	$6,69 \cdot 10^{-4}$	$1,95 \cdot 10^{-4}$	$9,53 \cdot 10^{-5}$	$6,38 \cdot 10^{-5}$	$5,08 \cdot 10^{-5}$
23	1,6	$4,79 \cdot 10^{-2}$	$9,60 \cdot 10^{-3}$	$1,32 \cdot 10^{-3}$	$2,39 \cdot 10^{-4}$	$6,71 \cdot 10^{-5}$	$3,84 \cdot 10^{-5}$	$3,40 \cdot 10^{-5}$	$2,89 \cdot 10^{-5}$
24	1,4	$5,61 \cdot 10^{-2}$	$1,49 \cdot 10^{-2}$	$2,89 \cdot 10^{-3}$	$7,04 \cdot 10^{-4}$	$2,09 \cdot 10^{-4}$	$9,90 \cdot 10^{-5}$	$6,66 \cdot 10^{-5}$	$5,95 \cdot 10^{-5}$

С ростом количества итераций декодирования наблюдается уменьшение коэффициента ошибок, причем после определенного порога это уменьшение становится несущественным, а значит, можно сократить количество итераций декодирования. Для большинства слу-

чаев (см. табл. 1 и 2) до шести итераций коэффициент ошибок изменяется в несколько раз, а после семи итераций декодирования наблюдается незначительное изменение. Для экспериментов № 2, 3, 6–9 граничным значением достаточно взять пять итераций декодирования.

Библиографический список

1. Turbo Encoder // Mathworks. – URL: <https://www.mathworks.com/help/comm/ref/turboencoder.html> (accessed 11 May 2019).
2. Скляр. Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение: пер. с англ. – 2-е изд., испр. – М.: Вильямс, 2003. – 1104 с.
3. Золотарев В.В., Овечкин Г.В. Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы: справ. / под. ред. чл.-кор. РАН Ю.Б. Зубарева. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 126 с.
4. 3rd Generation Partnership Project. Technical Specification Group Radio Access Network. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA). Multiplexing and Channel Coding, 3GPP TS 36.212.
5. Никифоров В.И., Речинский А.В., Черненькая Л.В. Понятийно-терминологический аппарат государственных образовательных стандартов системы непрерывного профессионального образования // Alma mater (Вестник высшей школы). – 2013. – № 11. – С. 43–47.
6. Обеспечение качества высшего образования / А.М. Александров, В.Е. Магер, Л.В. Черненькая, А.В. Черненький // Открытое образование. – 2016. – Т. 20, № 4. – С. 10–16.

Сведения об авторах

Дубовцева Дарья Александровна – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ТК3-17-1м, г. Пермь, e-mail: dasha.dubovtseva@mail.ru

Фрейман Владимир Исаакович – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: vfrey@mail.ru

А.П. Даденкова

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА СНИЖЕНИЯ НАГРУЗКИ И ПОВЫШЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ ПОИСКА ДАННЫХ В DHT-СЕТИ

Выполняется анализ влияния параметров модели протокола DHT на сетевую нагрузку и предлагаются способы ее снижения с повышением вероятности нахождения данных в файлообменной сети.

Ключевые слова: имитационное моделирование, протоколы поиска данных, децентрализованные файлообменные сети, AnyLogic, DHT, P2P.

A.P. Dadenkova

DEVELOPMENT OF ALGORITHMS TO REDUCE THE LOAD AND MAKE MORE EFFICIENT RETRIEVAL OF DATA IN THE DHT-NETWORK

The paper analyzes the influence of DHT protocol model parameters on the network load, and suggests ways to reduce it with increasing probability of finding data in a file-sharing network.

Keywords: simulation modeling, data retrieval protocols, decentralized file sharing networks, AnyLogic, DHT, P2P.

Современный этап развития инфокоммуникационных сетей тесно связан с применением распределенных технологий (P2P). В связи с широким распространением децентрализованных технологий возрастает актуальность подробного исследования алгоритмов и протоколов и необходимость предложения новых рекомендаций по увеличению эффективности их функционирования. В частности, одним из наиболее распространенных протоколов децентрализованного хранения и поиска данных является протокол DHT [1]. Примером использования данного протокола могут служить такие сети, как BitTorrent, I2P, ONet и др.

Актуальность исследования протокола DHT обуславливается недостаточностью исследований влияния параметров сети на результативность поиска данных, на общесетевую нагрузку и возможность адаптивной работы протокола.

Особенность протокола заключается в логическом распределении узлов в сети, каждый из которых обладает данными и может свободно делиться ими с другими пользователями сети. При этом все взаимодействие узлов сети, в том числе и поиск данных, происходит без участия сервера. Данный способ взаимодействия становится возможным благодаря идентификаторам: каждый узел сети и каждый блок данных имеют свои уникальные идентификаторы (hashID и infoHash соответственно) из общего 160-битного пространства, генерируемые при подключении к сети. Для начала взаимодействия узлов в сети сервер заполняет DHT-таблицы пользователей информацией о других участниках обмена определенным числом v записей.

Данным в сети присваивается уникальный идентификатор, наиболее близкий к идентификатору источника этих данных. Далее из таблицы узла выбираются m представителей, которые будут знать о наличии у него данной информации. Таким образом, при необходимости поиска узел начинает опрашивать из своей таблицы не все множество узлов, а только корзину k наиболее близких к идентификатору данных. После того, как узлы из таблицы передали данные о своих корзинах (наиболее близких узлах к искомым данным), узел добавляет их в свою таблицу, сортирует ее и снова опрашивает уже измененную корзину. Данный процесс длится, пока не закончится нормативная глубина поиска q , т.е. количество итеративных обращений к DHT-таблице.

Для подробного изучения особенностей протокола разработана имитационная модель в системе объектного дискретно-событийного моделирования AnyLogic [2]. Среда позволяет учитывать все параметры алгоритма поиска для корректного моделирования, что позволит провести необходимые исследования и сформировать рекомендации по выбору параметров DHT-сети.

Работа по исследованию алгоритма поиска DHT началась с разработки базовой модели [2]. Первоначальное исследование было направлено на изучение влияния параметров протокола (размер корзины, глубина поиска, начальное количество записей в таблице и общее количество узлов в сети) на результативность поиска данных [3]. В результате проведенных экспериментов были выявлены рациональные значения глубины поиска и размера корзины для успешного поиска данных без избыточной нагрузки на сеть [3]. Данные параметры использованы в статье (см. ниже).

Следующим этапом было проведение серии экспериментов, направленных на снижение нагрузки на сеть без уменьшения вероятности нахождения данных [4]. Для этого было разработано два алгоритма, при которых поиск данных останавливается до заданного уровня глубины поиска, но результативность при этом остается на прежнем уровне. В первом случае используется остановка при нахождении данных до граничного значения параметра. Во втором случае поиск останавливается при условии неизменности корзины узла, т.е. отсутствии новых пользователей. Оба способа продемонстрировали снижение нагрузки на сеть с постоянным уровнем вероятности нахождения данных в сети.

Настоящая работа посвящена разработке и исследованию нового алгоритма поиска данных в сети. Алгоритм направлен на повышение вероятности нахождения данных наряду со снижением избыточной сетевой нагрузки при поиске данных. В основу алгоритма положена совокупность ранее проанализированных в отдельности способов:

1. Остановка поиска при нахождении данных (модификация 1).
2. Остановка поиска при неизменности корзины DHT-таблицы узла (модификация 2).
3. Остановка поиска при достижении заданной глубины поиска (базовая модель).

Для определения эффективности вносимых изменений в модель используются две важнейшие характеристики: вероятность нахождения данных и нагрузка на сеть. Вероятность нахождения данных (результативность) определяется отношением успешного числа исходов поиска данных к общему числу прогонов имитационной модели. Нагрузка на сеть определяется двумя способами:

1. Количество задействованных в поиске узлов по числу итераций:

$$U = q(k + k^2).$$

2. Количеством уникальных узлов, которые были опрошены.

Для получения корректных оценок значений параметров исследование выполняется несколько раз с большим числом прогонов, равным 1000, и вычисляются средние значения характеристик.

Модель исследуется для принятых [3] типовых значений параметров сети:

- общее количество узлов в сети – 50 000;
- начальное количество записей в DHT-таблице узлов – 1000;
- размер корзины – 8;

- глубина поиска – 8;
- количество циклов прогона модели – 1000.

Таким образом, нагрузка, рассчитанная первым способом (количество итераций поиска данных), в базовой модели составляет: при поиске данных одним узлом – 576, на 1000 циклов повтора модели – 576 000. Второй метод расчета нагрузки, при прочих равных условиях, показывает нагрузку опроса 23 308 уникальных узлов на 1000 циклов поиска данных.

Аналогичным образом рассчитывается итоговая сетевая нагрузка при использовании методов снижения нагрузки (модификация 1, модификация 2, модификация 1 + 2). График изменения нагрузки сети, рассчитанный первым способом, при глубине поиска 5 и 8 для различных модификаций модели показан на рис. 1. Аналогичный график изменения нагрузки сети, рассчитанный вторым способом, при глубине поиска 5 и 8 для различных модификаций модели показан на рис. 2. При этом базовая модель означает стандартную работу протокола, модификация 1 подразумевает остановку поиска при успешном нахождении данных на любом этапе поиска, модификация 2 – остановка поиска при неизменности корзины между итерациями, модификация 1+2 – использование двух модификаций вместе.

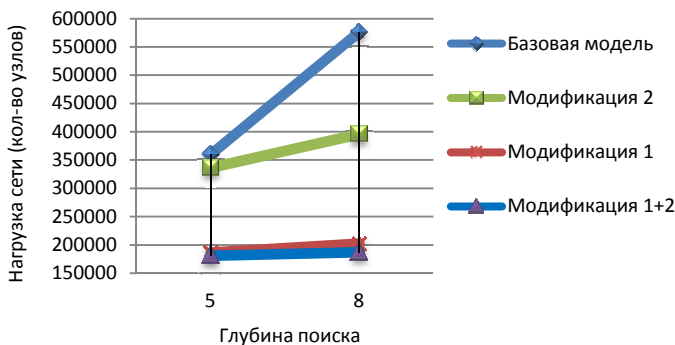


Рис. 1. График зависимости нагрузки в сети, рассчитанный первым способом, от используемого метода при разных значениях глубины поиска

Поскольку используемые методы сокращения нагрузки не влияют на результативность поиска, значения вероятности нахождения данных в сети для всех графиков одинаковы – 92,85 % при глубине поиска 5 и 93,5 % при глубине 8.

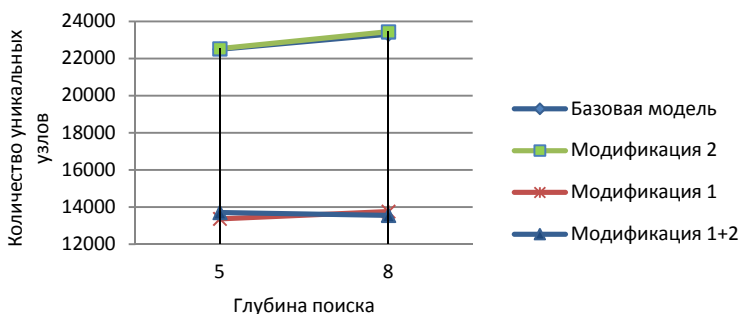


Рис. 2. График зависимости нагрузки в сети, рассчитанный вторым способом, от используемого метода при разных значениях глубины поиска

Как видно из первого графика, при глубине поиска 5 разница между нагрузкой базовой модели и модификацией 2 составляет 6,6 %, а при глубине поиска 8 разница возрастает до 31,3 %, т.е. возрастает на 24,7 %. При этом разница в количестве уникальных записей мала и составляет 0,108 % при глубине поиска 5 и 0,56 % при глубине 8. Таким образом, модификация остановки поиска по неизменности корзины позволяет ускорить поиск в сравнении с базовой моделью и сократить нагрузку в сети до 30 %.

При переходе от базовой модели к модели с модификацией 1 получено снижение количества задействованных узлов (нагрузка, рассчитанная первым способом) на 48,2 % при глубине поиска 5 и на 64,9 % при глубине поиска 8. Если рассмотреть количество уникальных узлов, задействованных в поиске, то при глубине поиска 5 снижение составит 40,6 %, при глубине поиска 8 – 41 %. Сохранение неизменного уровня результативности при значительном (>40 %) сокращении сетевой нагрузки свидетельствует о существенной избыточности нагрузки базовой модели алгоритма поиска данных.

При использовании совместной модификации (нового алгоритма) получено снижение общесетевой нагрузки по первому способу до 49,8 % при глубине поиска 5 и до 67,5 % при глубине поиска 8. Снижение нагрузки по второму способу расчета составляет 39,1 % при глубине поиска 5 и 41,9 % при глубине 8 (рис. 2). Таким образом, комбинирование модификаций позволяет получить максимальное снижение нагрузки (до 70 %) без уменьшения результативности поиска данных.

Предложенная модификация алгоритма позволяет сократить избыточность сетевой нагрузки без влияния на результативность поиска. Это достигается благодаря остановке поиска адаптивно к наступлению хотя бы одного события: достижение глубины поиска, нахождение источника данных, неизменность корзины узлов. Путем изменения фиксированного значения глубины поиска для совместной модификации есть возможность увеличить результативность поиска на итерациях после 5. При этом при остановке поиска на конечном значении глубины поиска нагрузка на узлы оказывается бесполезна – данные не найдены даже в результате большого приложения силы. Ввиду этого важно оценить, насколько имеет смысл в таком случае продолжать поиск и может ли он повлиять на эффективность поиска данных.

Для исследования эффективности поиска данных на итерациях алгоритма с номерами больше 5 в имитационной модели добавлены элементы сбора статистики. Результаты показаны в матрицах плотности распределения успешного (рис. 3) и неудачного (рис. 4) поиска данных.

От	До	1	2	3	4	5	6	7	8
8	9	0	8	1	0	0	0	0	0
7	8	3	12	2	0	0	0	0	0
6	7	4	26	9	0	0	0	0	0
5	6	7	49	16	5	0	0	0	0
4	5	17	67	23	6	1	0	0	0
3	4	23	95	39	7	1	2	0	0
2	3	33	111	74	21	8	1	0	0
1	2	18	120	78	28	17	8	6	1
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0

Рис. 3. Матрица числа новых записей, добавленных в корзину узла по итерациям с результативным завершением поиска данных

От	До	1	2	3	4	5	6	7	8
8	9	895	164	8	0	0	0	0	0
7	8	0	123	10	0	0	0	0	0
6	7	0	85	16	1	0	0	0	0
5	6	0	33	27	12	1	0	1	0
4	5	0	2	28	10	3	1	0	0
3	4	0	0	86	14	6	2	0	0
2	3	0	0	26	33	7	4	0	0
1	2	0	0	4	18	23	10	1	0
0	1	0	0	0	3	7	7	2	0

Рис. 4. Матрица числа новых записей, добавленных в корзину узла по итерациям с нерезультативным завершением поиска данных

На рисунках по горизонтальной оси отмечены номера итераций, по вертикальной – диапазоны количества новых добавленных узлов в корзину узла, значения матрицы – число прогонов модели, удовлетворяющее результату поиска. С использованием полученной статистики возможно выполнение оценки нагрузки и результативности нахождения данных отдельно для каждой итерации и диапазона узлов, что позволит получить корректные выводы.

Оценка результативности поиска R на итерациях 5–8 выполняется через отношение успешных результатов поиска данных S к общему числу добавленных записей (в матрицах S – см. рис. 3 и F – см. рис. 4):

$$R = \frac{\sum S}{\sum S + \sum F}. \quad (1)$$

Расчет сетевой нагрузки N по итерациям может быть выполнен по формуле

$$N_i = \sum(S_i d_i) + \sum(F_i d_i), \quad (2)$$

где S_i , F_i – количество случаев добавления записей из i -го интервала, d_i – количество новых записей в корзине таблицы на i -й итерации.

Расчет полезной нагрузки N_n выполняется оценкой отношения добавленных в корзину результативных записей на итерации к общему числу записей, добавленных на итерации:

$$N_n = \frac{\sum(S_i d_i)}{\sum(S_i d_i) + \sum(F_i d_i)}. \quad (3)$$

Результаты расчета характеристик по формулам (1)–(3) приведены в таблице. Данные по нагрузке приведены для 1000 прогонов модели.

Оценки результативности поиска и нагрузки на сеть

Номер итерации	Результативность поиска, %	Сетевая нагрузка	Полезная сетевая нагрузка
5	36	186	67 (36 %)
6	20	69	17 (24,6 %)
7	60	22	12 (54,5 %)
8	100	2	2 (100 %)

Анализ результатов иллюстрирует высокую вероятность нахождения данных на итерациях с номерами 5–8, которая для рассматриваемого случая моделирования составляет более 24 %. Полученные результаты характеризуются и низким уровнем сетевой нагрузки (по сравнению с сетевой нагрузкой до итерации 5). Таким образом, целесообразным является использование итераций 5–8 для нахождения данных в сети.

Библиографический список

1. DHT Protocol // BitTorrent.org. – URL: http://www.bittorrent.org/beps/bep_0005.html (accessed 12 May 2019).
2. Даденкова А.П. Построение модели файлообменной сети с протоколом DHT // Научно-технический вестник Поволжья. – 2017. – № 6. – С. 183–186.
3. Даденкова А.П. Исследование характеристик модели файлообменной сети с протоколом DHT // Научно-технический вестник Поволжья. – 2018. – № 8. – С. 72–75.
4. Даденкова А.П. Анализ способов сокращения нагрузки в файлообменной сети с протоколом DHT // Научно-технический вестник Поволжья. – 2018. – № 12. – С. 210–212.

Сведения об авторе

Даденкова Алена Павловна – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ТК3-18-1м, г. Пермь, e-mail: dadenkova@yandex.ru

Д.В. Якунина, М.М. Кулагина

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ЦИФРОВЫХ ТРАКТОВ СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЕЙ

Рассмотрена разработка помехоустойчивого тракта цифрового сигнала.

Ключевые слова: цифровой тракт, помехоустойчивость.

D.V. Yakunina, M.M. Kulagina

STUDY OF THE NOISE STABILITY OF DIGITAL TRAITS OF THE REMOTE CONTROL SYSTEM OF POWER PLANT

This article describes the development of a noise-resistant digital signal path.

Keywords: digital path, noise immunity.

Проблема сбора, передачи и обработки информации, необходимой непосредственно для управления процессом производства, является актуальной и сложной задачей, в решении которой важную роль играет разработка систем телеизмерения, телесигнализации и телеуправления.

В работе рассматривается разработка помехоустойчивого тракта телеуправления. Целью разработки тракта телеуправления является передача информации, которая получена от источника сигнала, на пульт диспетчера.

При разработке помехоустойчивого тракта телеуправления учитывается, что цифровые тракты с точки зрения помехоустойчивости характеризуются вероятностью правильной передачи сообщения, вероятностью трансформации сообщения и вероятностью стирания сообщения¹.

Вероятность ошибки на символ – 10^{-3} .

Вероятность трансформации сообщения – не хуже 10^{-6} .

Вероятность стирания сообщения – 10^{-5} .

¹ Кон Е.Л., Фрейман В.И. Теория электрической связи. Помехоустойчивая передача данных в информационно-управляющих и телекоммуникационных системах: модели, алгоритмы, структуры. Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2007. 312 с.

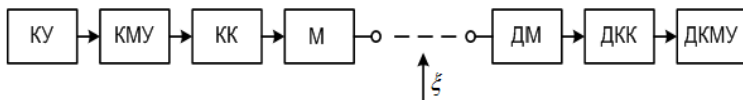


Рис. 1. Схема тракта телеуправления: КУ – ключи управления;
КМУ – комбинаторный узел; КК – кодер канала; М – модулятор;
ДМ – демодулятор; ДКК – декодер канала; ДКМУ – декомбинаторный узел

На рис. 1 приведена общая схема тракта телеуправления.

В соответствии с обобщенной схемой тракта телеуправления был построен помехоустойчивый тракт телеуправления для системы дистанционного управления электростанцией.

Для построения тракта телеуправления был проведен расчет параметров циклического систематического кода (для этого необходимо знать число исполнительных механизмов (ИМ)). Сообщение представляется в виде набора замкнутых/разомкнутых ключей управления. На данной электростанции происходит управление 38 исполнительными механизмами (вкл/выкл) – управление высоковольтными выключателями на вводах, отходящих линиях, секционных выключателях, силовых трансформаторах и трансформаторах напряжения. При расчете было использовано трехступенное кодирование, где исходный код будет состоять из двухступенной адресной части, содержащей номер группы и номер ИМ в группе, а также информационной части, определяющей положение ИМ (вкл/выкл).

Дальнейшая разработка тракта телеуправления заключается в разработке комбинатора информационных символов. Комбинатор – это логический элемент, имеющий несколько выходов и входов, реализованный на логических дизъюнкторах. Выходы комбинатора являются входами кодирующего устройства.

Кодирующее устройство (кодер) предназначено для приема и промежуточного хранения информационной части $u(x)$, вычисления избыточных символов, формирования полинома $V(x)$ и передачи его в канал связи. Основным элементом кодирующего устройства является регистр сдвига с линейной логической обратной связью (РСЛЛОС). Структурная схема регистра сдвига определяется проверочным полиномом $g(x)$ и $h(x)$. Исследования показали, что при построении кодера $g(x)$ и $h(x)$ на декодирующее устройство в обоих случаях подается одинаковый вектор $V(x)$.

Для исследования декодирующих устройств был построен декодер Меггита. Он предназначен для выполнения следующих функций: прием и промежуточное хранение кодового полинома $V(x)$; вычисление полинома синдрома $S(x)$; реализация корректирующих свойств кода (исправление и/или обнаружение ошибок).

Была промоделирована работа декодера Меггита для различных режимов передачи сообщения: правильная передача, однократная ошибка, двукратная ошибка, трехкратная ошибка. Моделирование показало, что при однократной ошибке сообщение исправляется, при двукратной ошибке сообщение стирается, при трехкратной ошибке происходит трансформация принятого сообщения (одно сообщение заменяется другим).

И наконец, разработка декомбинатора информационных символов. Декомбинатор выделяет пришедшее сообщение для выделения номера исполнительного механизма и его включения.

Таким образом, в данной работе более подробно рассмотрено определение тракта телеуправления и описано предназначение каждого элемента в этом тракте.

Сведения об авторах

Якунина Дарья Васильевна – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. АТ6-17-1м, г. Пермь, e-mail: dasayakunina@gmail.com

Кулагина Марина Михайловна – старший преподаватель кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: mmkulag@mail.ru

С.Н. Рыбникова, С.А. Тюрин

NARROW-BAND IOT: СТРУКТУРА И ПРИНЦИП РАБОТЫ

Рассмотрена одна из технологий сетей дальнего радиуса действия NB-IoT, работающая поверх LTE, с точки зрения архитектуры сети радиодоступа.

Ключевые слова: LPWAN, интернет вещей, LTE IoT, NB-IoT.

S.N. Rybnikova, S.A. Tyurin

NARROW-BAND IOT: STRUCTURE AND OPERATING PRINCIPLE

This article describes one of the long-range network technologies - NB-IoT, working on top of LTE, from the point of view of the radio access network architecture.

Keywords: LPWAN, Internet of Things, LTE IoT, NB-IoT.

В 13-м релизе 3GPP представил набор из двух технологий для Интернета вещей и межмашинной коммуникации, которые разработаны для работы поверх сети LTE: LTE-M и NB-IoT. В данной статье более детально разберемся со второй. Narrow-Band IoT (NB-IoT) – это узкополосная технология, которая оптимизирована для редких передач небольших объемов данных и избавлена от функциональности, которая не служит этой цели. NB-IoT характеризуется энергоэффективностью, а также возможностью работы при низких уровнях сигнала и высоком уровне шумов.

Радиоканал. Ширина радиоканала выбирается равной ширине радиоблока LTE – 180 кГц, как в восходящем, так и в нисходящем канале. В радиодоступе нисходящего канала используется технология мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM) (рис. 1, а). Каждый OFDM-символ содержит 12 поднесущих с разносом по 15 кГц, что формирует полосу шириной 180 кГц [1].

В восходящем канале организована технология множественного доступа с частотным разделением на одной несущей частоте (SC-FDMA). Возможны два варианта организации ресурсной сетки: 1) аналогичен нисходящему каналу, где разнос поднесущих 15 кГц, длительность одного слота 0,5 мс, количество OFDM-символов

в слоте 7; 2) разнос поднесущих 3,75 кГц, длительность одного слота 2 мс, количество OFDM-символов 7. Разделение ресурсного блока происходит на 48 поднесущих (рис. 1, б) [1].

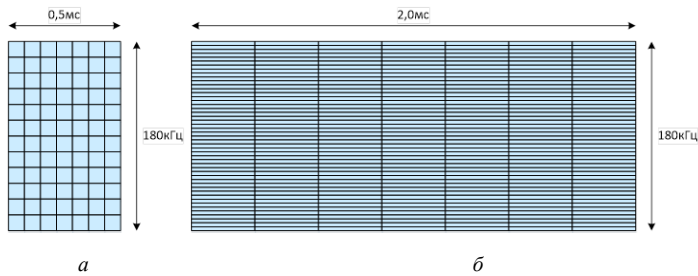


Рис. 1. Радиоканалы в направлении вверх и вниз

Имеется три способа выделения частотного ресурса: stand alone, guard band и in band [2].

Stand alone (автономный режим работы). Происходит выделение одного частотного интервала 200 кГц в диапазоне GSM, что позволяет организовать NB-радиоканал с двумя защитными интервалами по 10 кГц. Но в реальности происходит реформирование двух каналов GSM для одного NB-канала с защитными интервалами по 100 кГц, что в итоге приводит к ширине канала 400 кГц (рис. 2, а). Ввиду этого данный способ является как экономически, так и по занимаемым частотным интервалам затратным.

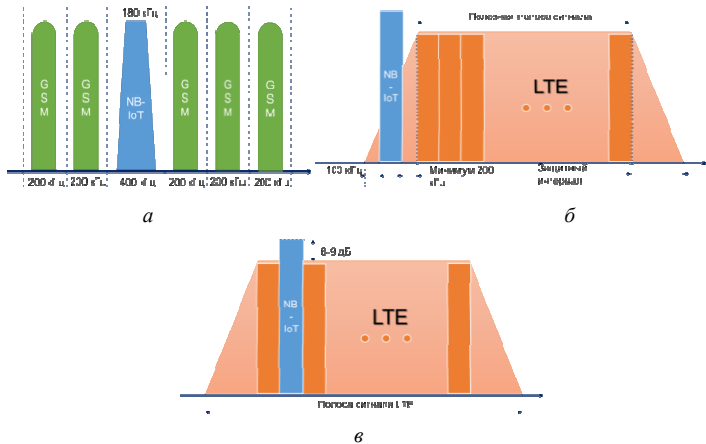


Рис. 2. Способы выделения частотного ресурса

Guard band (работа в защитной полосе сети LTE). Выделение ресурсного блока происходит в защитном интервале за пределами рабочей полосы частот (рис. 2, б). Поскольку ширина канала NB-IoT равна 180 кГц, а защитные интервалы для данного способа равны как минимум 100 и 200 кГц, следовательно, защитный интервал LTE должен быть больше 480 кГц. В табл. 1 видно, что эти условия удовлетворяются при полосах частот LTE, равных 10, 15 и 20 МГц. Этот вариант позволяет одновременно сэкономить частотный ресурс и уменьшить взаимное влияние с LTE-сетью, хотя ухудшаются параметры внеполосных излучений для LTE.

Таблица 1

Защитные интервалы для разных рабочих полос LTE

Полоса частот LTE, МГц	1,4	3	5	10	15	20
Полезная полоса сигнала, МГц	1,08	2,7	4,5	9	13,5	18
Защитные интервалы, кГц	2×160	2×150	2×250	2×500	2×750	2×1000

In band (работа в полосе частот LTE). В данном случае происходит выделение одного ресурсного блока в рабочей полосе частот, используемой для предоставления услуг LTE (рис. 2, в). При этом не все ресурсные блоки могут быть выделены для NB-IoT, шесть ресурсных блоков в центре спектра выделены для передачи сигналов синхронизации и служебной информации сети LTE, а также для минимизации смещения центральной частоты. Табл. 2 отражает номера ресурсных блоков, которые могут быть выделены под нужды NB для разных рабочих полос LTE. Как видно, в полосе 1,4 МГц ресурс не может быть выделен. Для большей дальности NB-IoT-несущая имеет повышенную мощность на 6–9 дБ.

Таблица 2

Номера ресурсных блоков, которые могут быть выделены для NB-IoT

Полоса частот LTE, МГц	1,4	3	5	10	15	20
Количество LTE PRB	6	15	25	50	75	100
LTE PRB-индексы для in band	–	2, 12	2, 7, 17, 22	4, 9, 14, 19, 30, 35, 40, 45	2, 7, 12, 17, 22, 27, 32, 42, 47, 52, 57, 62, 67, 72	4, 9, 14, 19, 24, 29, 34, 39, 44, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95

Этот способ хорошо подходит для экономии частотного ресурса, но при этом имеется проблема с взаимным влиянием с LTE-сетью.

Стратегии распределения ресурсов. Существует три стратегии распределения ресурсов между трафиками LTE и NB-IoT, они представлены на рис. 3:

а) статистическая – в этом случае все ресурсы строго разделены между NB-IoT и LTE [3]. Эта стратегия хоть и является самой простой, но ее следует использовать только для систем, где средняя нагрузка редко изменяется во времени, известна заранее или может быть предвидена;

б) динамическая – общий объем ресурсов доступен для обоих трафиков – NB-IoT и LTE [3]. Для небольшого числа подключенных устройств NB-IoT данная стратегия превосходит статистическую. Но рост трафика NB-IoT сопровождается увеличением вероятности блокировки LTE, поскольку трафик NB-IoT начинает конкурировать за ресурсы и со временем сможет доминировать в общем диапазоне. Данный случай можно рекомендовать для систем, где средние нагрузки каждого трафика сопоставимы или для нестабильных систем, где нагрузка может сильно изменяться во времени;

в) динамическая с резервированием – определенный объем ресурсов зарезервирован для трафиков каждого типа – NB-IoT и LTE, а остальные ресурсы динамически распределяются между ними [3]. Это самый оптимальный случай, так как объединяет первые две стратегии. При низких нагрузках стратегия ведет себя как динамическая, а при высоких – как статистическая.

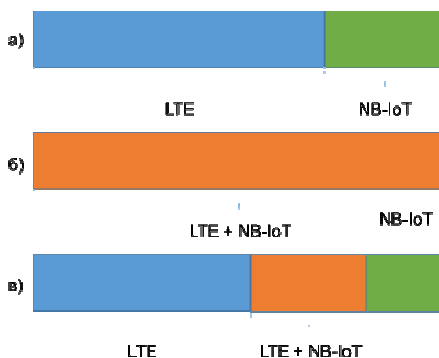


Рис. 3. Стратегии распределения ресурсов между LTE и NB-IoT

Энергосбережение. Как уже было сказано, одним из преимуществ NB-IoT-сетей является энергоэффективность. Заявленный срок автономной работы устройства от одной батареи до 10 лет. Малое энергопотребление достигается за счет применения двух технологий eDRX и PSM.

Технология eDRX (расширенный режим прерывистого приема) – это режим, при котором устройство принимает сообщения от сети не постоянно, а периодически в пределах определенного окна приема пейджинга (paging time window) (рис. 4) [1]. В отличие от предыдущей версии – DRX, расширенный режим позволил существенно увеличить период времени, когда приемный тракт устройства выключен. Период прерывистого приема eDRX составляет от 20,48 до 10 485,76 с (около 3 ч).

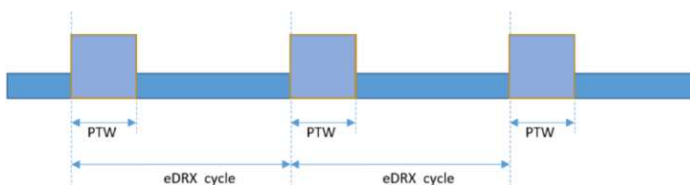


Рис. 4. Функционирование режима eDRX

Технология PSM (режим сохранения энергии) – это режим, который позволяет устройству надолго выключать радиомодуль, оставаясь при этом зарегистрированным в сети длительное время (рис. 5). При выполнении каждой процедуры перерегистрации (Trackeng Area Update) M2M-терминал запрашивает режим PSM, а сеть подтверждает его использование и устанавливает два таймера на некоторые значения. Таймер T3324 определяет время, в течение которого устройство будет доступно после выхода из режима ожидания (idle mode). И таймер T3412, после истечения которого происходит процедура актуализации TAU. Значение данного таймера может достигать 413 дней [1].

Бюджет радиолинии. Существует множество вариантов использования IoT, которые могут выиграть от более глубокого покрытия сети, особенно для устройств, развернутых в сложных местах, таких как счетчики коммунальных услуг. В табл. 3 можно посмотреть расчеты бюджетов радиолиний для LTE и NB-IoT [4]. Как видно, бюджет NB-IoT улучшен на 20 дБ.

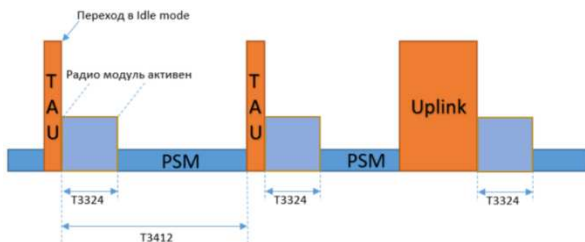


Рис. 5. Функционирование режима PSM

Таблица 3

Бюджет радиолинии

Характеристика	NB-IoT		LTE
	15 кГц	3,75 кГц	
(1) Мощность передачи (dBm)	23,0	23,0	23
(2) Плотность теплового шума (dBm/Hz)	-174	-174	-174
(3) Показатель шума приемника (dB)	3	3	5
(4) Занятая полоса пропускания канала (Hz)	15000	3750	15000
(5) Эффективная мощность шума = (2) + (3) + 10·log ((4)) (dBm)	-129,2	-135,3	-127,2
(6) Требуемое отношение сигнал/шум (dB)	-11,8	-5,7	9,5
(7) Чувствительность приемника = (5) + (6) (dBm)	-141,0	-141,0	-117,7
(8) Максимальные потери на радиолинии = (1) - (7) (dB)	164,0	164,0	140,7

Coverage enhancement (улучшение покрытия). Как видно из табл. 3, NB-IoT может декодировать сигнал при низком отношении сигнал/шум. Это стало возможно с coverage enhancement, который достигается последовательными повторениями передаваемого сигнала. Решение об успешности принятого сигнала происходит по принципу мажоритарного декодирования после приема и обработки всего блока сообщений (рис. 6).

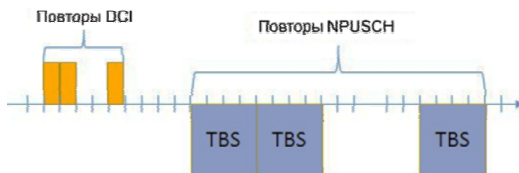


Рис. 6. Повторы в NB-IoT

Количество повторов может варьироваться в широких пределах и задается индивидуально для каждого типа физического канала и его

формата. Стандартом специфицированы следующие значения для полезного сигнала: в направлении вверх до 128 и в направлении вниз до 2048 [2].

NB-IoT является одной из самых перспективных технологий для интернета вещей, многие операторы и телеком-компании делают выбор в пользу данной технологии. Ключевое преимущество NB-IoT по сравнению со схожими технологиями, такими как LoRa, Sigfox, СТРИЖ, заключается в том, что NB-IoT выступает как глобальная вендорнезависимая технология, развиваемая консорциумом 3GPP и позволяющая операторам связи внедрять услуги интернета вещей на базе оборудования существующих сетей связи LTE.

Библиографический список

1. Технология NB-IoT [Электронный ресурс] // Технологии связи. – URL: <https://itechinfo.ru/content/nb-iot> (дата обращения: 10.01.2019).
2. NB-IoT: как он работает? // Хабр: веб-сайт. – URL: https://habr.com/company/ru_mts/blog/430496/ (дата обращения: 10.01.2019).
3. Стратегии распределения радиоресурсов в гетерогенных сетях с трафиком Narrow-Band IoT / В.О. Бегишев, А.К. Самуйлов, Д.А. Молчанов, К.Е. Самуйлов // Системы и средства информатики. – 2017. – Т. 27, вып. 4. – С. 64–79.
4. NB-IoT presentation for IETF LPWAN // Docplayer. – URL: <https://docplayer.net/50723421-Nb-iot-presentation-for-ietf-lpwan.html> (accessed 10 January 2019).

Сведения об авторах

Рыбникова Светлана Николаевна – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ТК3-17-1м, г. Пермь, e-mail: svetich02@gmail.com

Тюрин Сергей Александрович – старший преподаватель кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: tiurinsa@yandex.ru

Д.А. Дубовцева, С.А. Тюрин

ТЕХНОЛОГИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЯХ

Приведена классификация технологий позиционирования и методы определения местоположения устройств. Рассмотрены технологии различного диапазона физического охвата, их применение и точность позиционирования.

Ключевые слова: технологии беспроводного позиционирования, определение местоположения объекта.

D.A. Dubovceva, S.A. Tyurin

TECHNOLOGIES FOR DETERMINING THE LOCATION OF MOBILE OBJECTS IN WIRELESS NETWORKS

This article provides a classification of positioning technologies and methods for determining the location of devices. Technologies of various physical coverage range, their application and positioning accuracy are considered.

Keywords: wireless positioning technologies, definition of object location.

Определение местоположения мобильных объектов является актуальной задачей. Существуют различные технологии измерения расстояния и определения местоположения.

Целью статьи является обзор методов позиционирования мобильных объектов.

В общем случае возможно определение своего местоположения либо другого интересующего объекта. Кроме того, местоположение объекта можно определить с использованием или без использования спутниковых систем. Услуги определения местоположения мобильного объекта могут предоставлять спутниковые системы навигации, операторы сотовых сетей, интернет-порталы. В статье [1] были рассмотрены технологии измерения расстояния. На них основываются методы определения местоположения, также описанные в источнике [2].

Методы позиционирования. *Методы обнаружения приближения* – идентификация позиции мобильного устройства как координат опорной точки. В сотовой связи используются Cell ID.

Триангуляция объединяет в себе три следующих метода:

- латерация – определение местоположения с использованием расстояний между опорной точкой и мобильным устройством. Используются измерения RSS и TOA;

- гиперболическое позиционирование. Расстояние между опорной точкой и мобильным устройством оценивается с использованием TDOA;

- ангуляция – это метод, который использует измерения AOA.

Радиоотпечаток (fingerprint). Метод рассмотрен в источнике [3]. Как правило, производятся измерения RSS от BTS и Wi-Fi точек доступа, Cell ID. Устройство, имеющее доступ к точному измерению координат GNSS (Global Navigation Satellite System), отправляет серверу вместе со своими координатами радиоотпечаток сигнала, пополняя тем самым базу образцов радиоотпечатков. Затем на сервере полученные данные обрабатываются, может вычисляться местоположение точек доступа Wi-Fi и BTS. При дальнейшем определении местоположения мобильного устройства, не имеющего GNSS, может быть использована триангуляция с использованием имеющихся данных о местности.

Инерциальное счисление. Вычисление географических координат, скорости и направления движения с использованием инерциальных датчиков (датчика скорости и датчика направления) применяется в составе модулей спутниковой навигации в качестве вспомогательного метода. Используется в случаях возможной потери сигналов со спутников – позволяет предсказать движение объекта (при проезде через автомобильные тоннели, места с ограниченной видимостью открытого неба) [2].

Гибридные подходы. Сочетание нескольких методов (например, ангуляция и латерация и др.). С использованием гибридных подходов может быть повышена точность оценки местоположения объекта.

Рассмотрим далее системы различного диапазона физического охвата.

Глобальное позиционирование. Класс глобального позиционирования представляют глобальные навигационные спутниковые системы (GNSS). Вычисляются временные задержки принимаемого сигнала от спутника по сравнению с сигналом, генерируемым аппаратурой потребителя. В табл. 1 показаны характеристики GNSS [4, 5, 6]. В идеальном варианте, когда измерения производятся точно и показания часов спутников и MS совпадают, для определения положения устройства в пространстве достаточно произвести измерения до трех навигационных спутников для трехмерных координат (широта, долгота, высота – три неизвестных параметра) [7]. Но из-за разности

хода часов приемника MS и спутника вводится четвертый неизвестный параметр и, соответственно, необходим четвертый спутник.

Таблица 1

Сравнение различных GNSS по точности

Метод позиционирования	Вид измерения	GNSS	Точность, м ($p = 95\%$)
Гиперболическое позиционирование	TDOA	GPS	2–4
		ГЛОНАСС	5–9
		Galileo	3–5

Определение местоположения по спутникам является наиболее точным по сравнению с другими системами. GNSS может использоваться для навигации автомобилей, морских судов, в авиации, при проведении спасательных операций, в военных целях.

К недостаткам GNSS относятся: дорогостоящая инфраструктура, ожидание приема сигнала, работа только на открытом воздухе.

GNSS предоставляют информацию о своем местоположении мобильного объекта. При необходимости узнать местоположение другого объекта можно использовать наземную беспроводную связь для передачи координат объекта.

Для увеличения точности используются дифференциальные методы DGNSS, это позволяет снизить погрешность определения местоположения до 5 см. Принцип DGNSS в следующем. Наземные станции с известными координатами сравнивают измеренные координаты с известными. На основе различий вычисляются поправки, которые передаются по геостационарным спутникам или наземной беспроводной связью.

Региональное позиционирование. Определение местоположения в сотовых сетях (табл. 2, точность и методы описаны в источниках [8–10]) базируется на основных технологиях измерения расстояния, но с некоторыми дополнениями. Так, измерение EOTD (Enhanced Observed Time Difference) основано на TDOA, но с применением измерений Real Time Difference от LMU (Location Measurement Unit): сигнал от BTS одновременно транслируется для LMU и MS. Местоположение LMU и BTS известно, RTD используются для вычисления временной поправки. OTDOA-IPDL (Idle Period Downlink) использует период простоя в нисходящей линии обслуживающей BTS для получения TDOA из других ячеек. UTDOA – измеряется сигнал и вычисляется TDOA от MS до BTS.

Региональное позиционирование

Метод позиционирования	Вид измерения	Технология	Точность, м
Обнаружение приближения	Cell ID	GSM	Размер соты
Латерация	TOA		550
Гиперболическое позиционирование	EOTD		50–125
	UTDOA		50
Гибридный подход	CellID+RTT	UMTS	>300
Гиперболическое позиционирование	OTDOA-IPDL		50–300
Гибридный подход	E-CID	LTE	>150
Гиперболическое позиционирование	OTDOA		50–300

Позиционирование осуществляется преимущественно на открытом воздухе, также доступна грубая оценка в помещении. Возможно определение своего местоположения и отслеживание другого объекта. Для этого в сотовой сети предусмотрены шлюзовые центры. Они отвечают за маршрутизацию вызовов между абонентами, а также извлекают координаты мобильного устройства и отправляют их к внешнему клиенту. Услуги определения местоположения предоставляются операторами сотовой связи и интернет-порталами.

Приложения, сочетающие в себе глобальное и региональное позиционирование за счет использования различных сигналов (Wi-Fi, GNSS и Cell), и их основные характеристики показаны в табл. 3 [3, 11].

Таблица 3

Технологии глобального и регионального позиционирования

Метод позиционирования	Вид измерения	Технология	Точность, м	Особенность
Гибридные подходы: триангуляция, радиоотпечатки	CellID, RSS, TDOA	Google Maps	10	Используются сигналы Wi-Fi, GNSS и Cell
		«Яндекс.Карты»		
		Skyhook location		

Локальное позиционирование. Основные технологии позиционирования в помещении и их характеристики рассмотрены в табл. 4 [12]. Для всех рассмотренных технологий используется метод триангуляции. Такие услуги чаще предоставляются специализированными компаниями в виде разрабатываемых платформ. Возможно определение своего местоположения и отслеживание другого объекта. Отслеживание объектов выполняется, как правило, по Wi-Fi-сети. Такие решения применяются в закрытых объектах, таких как торговые центры, музеи и выставки, метро, вокзалы и аэропорты, стадионы, склады и производство.

Технологии локального позиционирования

Вид измерения	Технология	Точность, м	Особенность
RSSI/TDOA/AOA	Wi-Fi	5–10	Зона охвата 100 м, широкое распространение, загруженность эфира Wi-Fi, недостаточная точность
RSSI	Bluetooth	5–10	Зона охвата 150 м, низкое энергопотребление, недостаточная точность
RSSI/TDOA	ZigBee	2–10	Зона охвата 300 м, низкое энергопотребление
TOA/TDOA/AOA	UWB	0,1–1	Зона охвата 20 м, высокая точность

Определение местоположения мобильных устройств для различных ситуаций требует различной точности. Сегодня существует множество методов и технологий позиционирования. В глобальном масштабе для рядового использования, например в навигации, достигается точность 2–10 м при использовании GNSS. При использовании сотовой сети для определения местоположения пока что точность на порядок ниже. В помещении точность составляет порядка 10 см. Также существуют методы коррекции оценок местоположения, которые позволяют достичь точности 5 см (DGNSS) при глобальном позиционировании для проектов, требующих повышенной точности.

Библиографический список

1. Ефимов С.С., Тюрин С.А. Технологии определения местоположения мобильных объектов в беспроводных сетях // Автоматизированные системы управления и информационные технологии: материалы всерос. науч.-техн. конф. (г. Пермь, 17 мая 2018 г.): в 2 т. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2018. – Т. 2. – С. 253–255.
2. João Figueiras, Simone Frattasi. Mobile positioning and tracking: from conventional to cooperative techniques. – Torquay, UK, 2010. – 268 p.
3. Определение местоположения без GPS: как устроен Яндекс. Локатор // Хабр: веб-сайт. – URL: <https://habr.com/company/yandex/blog/162955/> (дата обращения: 12.11.18).
4. William J. Hughes. Global Positioning System (GPS) Standard Positioning Service (SPS). Performance Analysis Report / Technical Center WAAS T&E Team. – URL: http://www.nstb.tc.faa.gov/reports/PAN96_0117.pdf (accessed 12 November 2018).

5. Точность навигационных определений ГЛОНАСС [Электронный ресурс] // Рос. сист. дифференциальной коррекции и мониторинга (СДКМ). – URL: http://www.sdcm.ru/smglo/st_glo?version=rus&rep-date&site=extern (дата обращения: 12.11.18).

6. Galileo Initial Services – Open Service Performance Report / European GNSS Agency. – April-May-June 2018. – URL: http://www.gsc-europa.eu/system/files/galileo_documents/Galileo-IS-OS-Quarterly-Performance_Report-Q2-2018.pdf (accessed 12 November 2018).

7. Принципы навигации / Информ.-аналит. центр координатно-времен. и навигац. обеспечения. – URL: <https://www.glonass-iac.ru/> (дата обращения: 25.11.18).

8. Balaram Singh, Soumya Pallai, Susil Kumar Rath. A survey of cellular positioning techniques in GSM Networks // Researchgate. – URL: https://www.researchgate.net/publication/256736858_A_Survey_of_Cellular_Positioning_Techniques_in_GSM_Networks (accessed 11 November 2018).

9. Adusei I.K, Kyamakya K., Jobmann K. Mobile positioning technologies in cellular networks: an evaluation of their performance metrics // Researchgate. – URL: https://www.researchgate.net/publication/256736858_A_Survey_of_Cellular_Positioning_Techniques_in_GSM_Networks (accessed 11 December 2018).

10. Performance of 3GPP Rel-9 LTE positioning methods // CWINS. – URL: http://www.cwins.wpi.edu/workshop10/pres/std_2.pdf (accessed 11 December 2018).

11. Precision Location // Skyhook. – URL: <https://www.skyhook.com/precision-location> (accessed 25 December 2018).

12. Осколкова А. Технологии локального позиционирования // Хабр: веб-сайт. – Ч. I. – URL: <https://habr.com/company/rtl-service/blog/281837/> (accessed 25 December 2018).

Сведения об авторах

Дубовцева Дарья Александровна – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ТКЗ-17-1м, г. Пермь, e-mail: dasha.dubovtseva@mail.ru

Тюрин Сергей Александрович – старший преподаватель кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: tiurinsa@yandex.ru

С.Н. Рыбникова, М.В. Кавалеров

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ СЕМЕЙСТВА Q-ROUTING НА РАЗНЫХ ВИДАХ ТОПОЛОГИЙ

Приведено исследование алгоритмов, основанных на Q-routing, на разных видах топологий при разных значениях нагрузки с точки зрения параметров, отвечающих за процесс обучения алгоритмов.

Ключевые слова: ad hoc, Q-routing, DRQ, AQRERM, маршрутизация.

S.N. Rybnikova, M.V. Kavalеров

STUDY OF Q-ROUTING FAMILY ALGORITHMS ON DIFFERENT TYPES OF TOPOLOGIES

This article presents a study of algorithms based on Q-routing on different types of topologies for different load values from the point of view of parameters responsible for the learning process of algorithms.

Keywords: ad hoc, Q-routing, DRQ, AQRERM, routing.

Рассматриваемое семейство алгоритмов в данной статье основано на обучении с подкреплением и создано для работы в ad hoc-сетях. У ad hoc-сетей отсутствует единый координирующий центр и предварительно выстроенная инфраструктура, а также для таких сетей характерна динамически изменяющаяся топология. Алгоритмы семейства Q-routing хорошо справляются с маршрутизацией в сетях такого рода, обеспечивая относительно малое время доставки пакетов даже в условиях высокой загруженности.

Алгоритмы будут исследоваться с точки зрения параметров обучения – начального превышения (overshoot) и времени установления процесса обучения (settling time) (рис. 1) – при разных нагрузках и видах топологий. Выбраны следующие алгоритмы из семейства: Q-routing [1], Dual Reinforcement Q-routing (DRQ) [2], Q-routing Adaptive Rate Random Echo with Route Memory (AQRERM) [3], а также те же алгоритмы только с оценками времени ожидания в соседней очереди для обновления Q-значений и имеющие индекс ‘y’. Для модели-

рования работы алгоритмов была выбрана интегрированная среда разработки, использующая агентно-ориентированный язык программирования NetLogo.

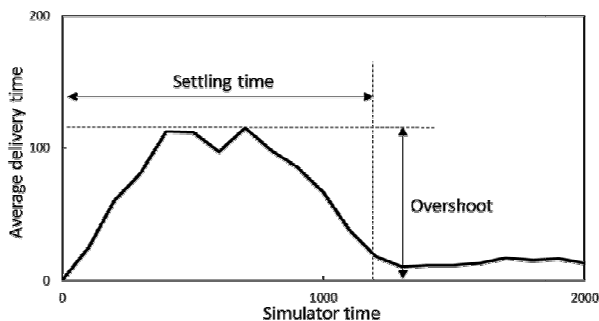


Рис. 1. Перерегулирование и время установления

Разные виды топологий. На рис. 2 представлена топология, являющаяся стандартной для различных исследований алгоритмов маршрутизации.

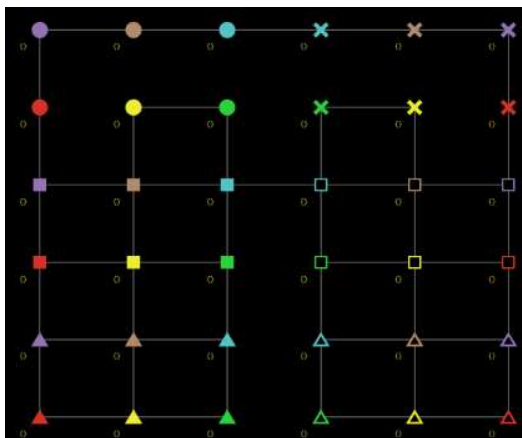


Рис. 2. Пример решетки сети 6×6

Реализованы еще две типовые сетчатые топологии большего и меньшего размеров. Первая топология состоит из 16 узлов (рис. 3, а), а вторая из 64 узлов (рис. 3, б). Они также имеют в своей архитектуре две части, соединенные двумя путями – кратчайшим и обходным.

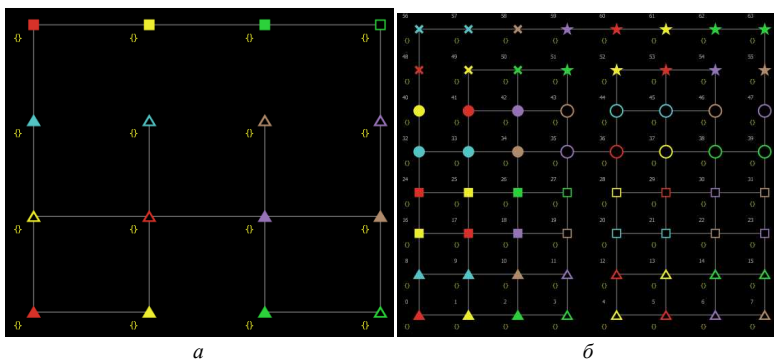


Рис. 3. Пример решеток сети 4×4 и 8×8

На рис. 4 представлена совсем иная топология из работы [4], в составе которой 15 узлов, соединенных определенным образом.

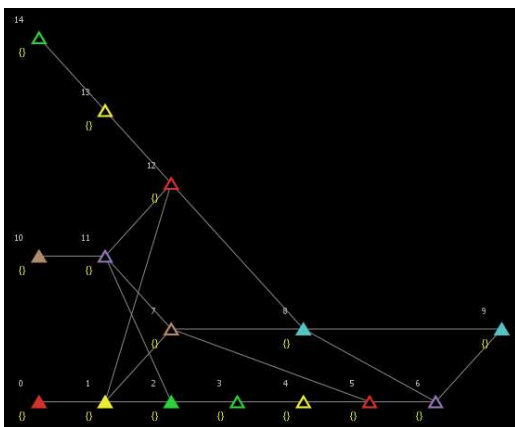


Рис. 4. Пример 15-узловой топологии

Результаты моделирования. Необходимо было провести экспериментальное исследование и определить оптимальные параметры алгоритмов маршрутизации. Ниже представлены результаты работы алгоритмов по критериям начального превышения и времени установления процесса обучения. Результаты моделирования алгоритмов с оценками времени ожидания в очереди узла-отправителя (без ‘у’) находятся справа, а результаты алгоритмов с оценками времени ожидания в очереди соседнего узла (с ‘у’) – слева (рис. 5–10).

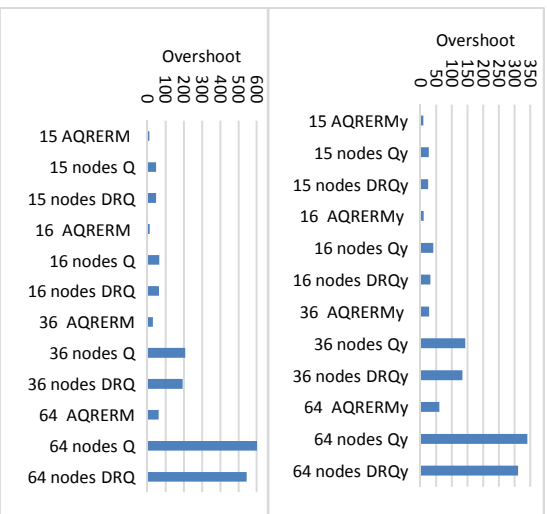


Рис. 5. Начальное превышение при низкой нагрузке $\lambda = 1$

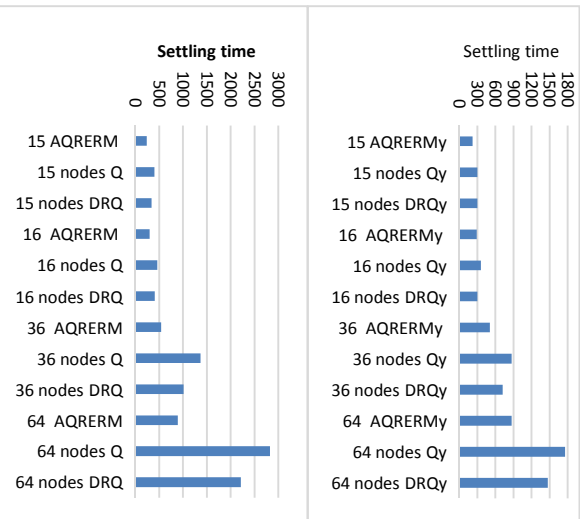


Рис. 6. Время установления процесса обучения при низкой нагрузке $\lambda = 1$

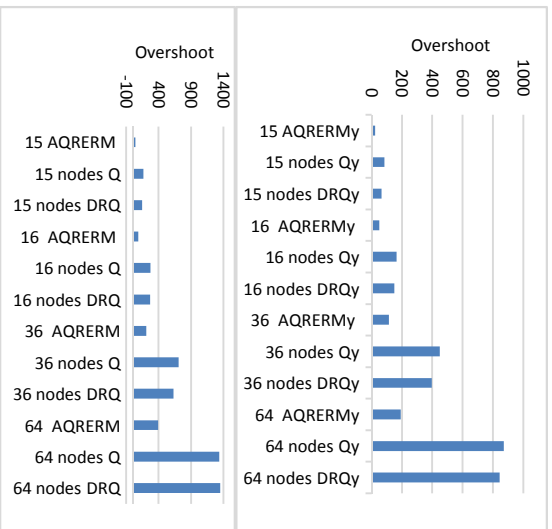


Рис. 7. Начальное превышение при средней нагрузке $\lambda = 3$

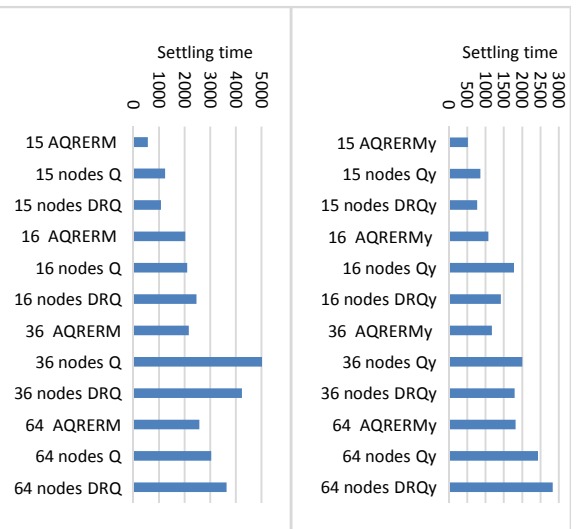


Рис. 8. Время установления процесса обучения при средней нагрузке $\lambda = 3$

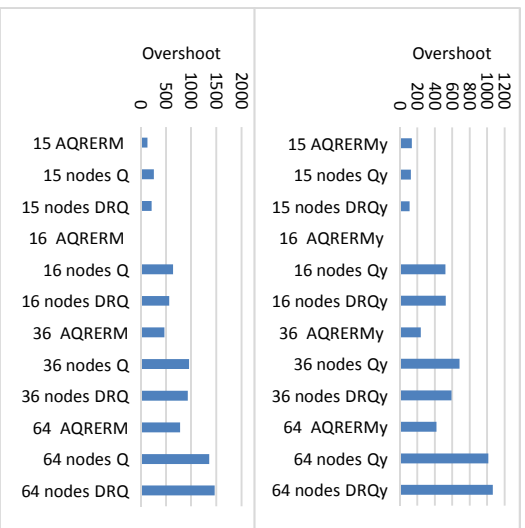


Рис. 9. Начальное превышение при высокой нагрузке $\lambda = 3,8$

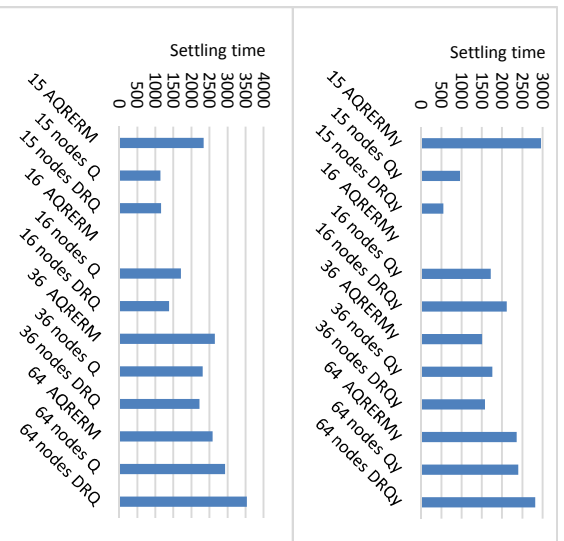


Рис. 10. Время установления процесса обучения при высокой нагрузке $\lambda = 3,8$

На основе результатов моделирования можно сделать вывод, что алгоритм AQRERM, предложенный в статье [3], имеет значимое преимущество перед протестированными алгоритмами маршрутизации, основанными на Q-routing, для рассмотренных видов топологий ad hoc-сети. При высокой нагрузке на топологии 4×4 алгоритм AQRERM не смог посчитать значения параметров overshoot и settling time. Можно предположить, что для разных сетей нужны разные диапазоны нагрузки λ – от минимального до предельного. На низких и средних нагрузках хорошие результаты показал алгоритм AQRERM как с ‘y’, так и без него. На высоких нагрузках для топологий с числом узлов 15 и 16 оказался немного лучше алгоритм DRQ.

Нужно помнить, что, когда невозможно получить хорошие оценки времени ожидания в очереди соседа у алгоритмов с ‘y’, следует использовать алгоритмы без ‘y’, так как они используют фактическое время, проведенное в очереди передающего узла.

Библиографический список

1. Boyan J.A., Littman M.L. Packet routing in dynamically changing networks: A reinforcement learning approach // *Advances in Neural Information Processing Systems*. – 1994. – P. 671–671.
2. Kumar S., Mikkulainen R. Dual reinforcement Q-routing: An on-line adaptive routing algorithm // *Proceedings of the Artificial Neural Networks In Engineering Conference*. – 1997. – P. 231–238.
3. Kavalero M., Shilova Y., Likhacheva Y. Adaptive Q-Routing with random echo and route memory // *2017 20th Conference of Open Innovations Association (FRUCT)*. IEEE. – 2017. – P. 138–145.
4. Choi S.P.M., Yeung D.Y. Predictive Q-routing: A memory-based reinforcement learning approach to adaptive traffic control // *Advances in Neural Information Processing Systems*. – 1996. – P. 945–951.

Сведения об авторах

Рыбникова Светлана Николаевна – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ТК3-17-1м, г. Пермь, e-mail: svetich02@gmail.com

Кавалеров Максим Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: mkavalero@gmail.com

Секция V

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Е.Л. Кротова, А.В. Чекменев, А.О. Болгов

МЕТОД ВЫДЕЛЕНИЯ СТЕГАНОГРАФИЧЕСКИХ ВОДЯНЫХ ЗНАКОВ ПО КЛЮЧУ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕЙВЛЕТОВ ХААРА

Рассмотрен способ нанесения закодированного СВЗ и последующее выделение его при помощи вейвлетов Хаара.

Ключевые слова: преобразование Хаара, стеганографические водяные знаки.

E.L. Krotova, A.V. Chekmenev, A.O. Bolgov

THE METHOD OF EXTRACTING THE SW BY KEY USING HAAR WAVELETS

This article describes a method for applying a coded SW and its subsequent selection using Haar wavelets.

Keywords: Haar transform, steganography watermarks.

В современном мире с его огромными, тяжело поддающимися контролю информационными потоками проблема отслеживания и тем более доказательства своего авторского права на цифровые информационные ресурсы встает особо остро. Зачастую для этого используют СВЗ (стеганографические водяные знаки). В данной статье сделана попытка осуществить один из таких алгоритмов СВЗ, а именно рассмотрен способ нанесения и последующего выделения стеганографического знака при помощи преобразований Хаара, а также кодирование и декодирование знака по специально сгенерированному ключу.

Метод Хаара. Метод Хаара для одномерного сигнала заключается в разбиении значений сигнала на полусумму и полуразность [5]:

$$x_1 = \frac{\text{value}_i + \text{value}_{i+1}}{2}, x_2 = \frac{\text{value}_i - \text{value}_{i+1}}{2}.$$

В контексте изображений эти значения представляют собой яркости пикселей в grayscale-формате. Полусумма представляет собой среднее значение яркости двух пикселей, а полуразность их отличие.

Чтобы посчитать новый вектор полусумм и полуразностей, следует просто умножить исходный вектор пикселей на матрицу преобразования: a – первый пиксель; b – второй пиксель.

$$\begin{pmatrix} 1/2 & 1/2 \\ -1/2 & 1/2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{a+b}{2} \\ \frac{a-b}{2} \end{pmatrix}.$$

Для восстановления необходимо умножить полусумму и полуразность на обратную матрицу преобразования:

$$\begin{pmatrix} \frac{a+b}{2} \\ \frac{a-b}{2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1/2 & -1/2 \\ 1/2 & 1/2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}.$$

Нанесение и выделение СВЗ. Для начала необходимо проверить, насколько возможен сам факт использования такого СВЗ (без кодирования). Для этого ниже приведен алгоритм нанесения и последующего выделения такого знака (рис. 1).



Рис. 1. Изображение с нанесенным СВЗ

Нанесение:

1. Считывается исходное изображение или кадр из видео, на которое необходимо нанести водяной знак.
2. Создается отдельная grayscale-копия исходного изображения.
3. На grayscale-изображении ищут область с похожей яркостью пикселей (в данном случае разность между максимальной и минимальной яркостью не больше 5).
4. Далее данная область на цветном изображении подвергается небольшому размытию.

5. К найденной области прикладывается маска водяного знака. Пример исходного изображения с нанесенным водяным знаком: как можно заметить, водяного знака на картинке не видно (рис. 2).

6. Далее, при необходимости выделения знака, картинка с нанесенной вотермаркой подвергается прямому преобразованию Хаара.

Выделим часть фотографии с шумами для лучшей видимости водяного знака (см. рис. 2).



Рис. 2. Изображение с СВЗ, подвергнутое преобразованию Хаара

Кодирование по ключу. Поскольку весь алгоритм выделения марки базируется на простом преобразовании Хаара, скрыть информацию в картинке или доказать, что данное видео является вашей собственностью, при помощи простого нанесения знака довольно затруднительно. А значит, необходимо добавить метод, который позволил бы однозначно доказать принадлежность объекта авторского права автору. Самым очевидным и, скорее всего, простым методом является кодирование/декодирование по ключу. Действительно, при попытке выделить нанесенный СВЗ, закодированный при этом специальным ключом, мы получим лишь непонятный шум вместо вотермарки (рис. 3).

На картинке выше (см. рис. 2) представлена попытка выделения водяного знака без предварительного декодирования по специальному ключу.

Для эксперимента в качестве ключа была использована простая строка символов, длина которой равна размеру СВЗ на изображении.

Каждый i -й символ в данной строке декодируется по таблице АСП в число, которое представляет собой количество пикселей, на которое нужно сдвинуть i -й столбец изображения с водяной маркой (если количество пикселей, на которое нужно сдвинуть столбец, превышает количество пикселей столбца, то следует просто смещать пиксели по кругу, т.е. последний пиксель столбца становится первым и т.д.). После символов в строке выделено 3 байта под кодирование размера водяного знака.



Рис. 3. Изображение с закодированной маркой, подвергнутое преобразованию Хаара

Формула сдвига столбцов для кодирования марки:

1. Копируем значения столбца изображения:

$\text{OneVectorValue}[i] = \text{WatermarkMatrix}[j][i]$,

где $i = 0 \div \text{WatermarkCols}$, $j = 0 \div \text{WatermarkRows}$.

2. Присваиваем эти значения обратно в матрицу, учитывая сдвиг и перенос:

$\text{WatermarkMatrix}[(j + \text{Key}[i]) \% \text{WatermarkRows}][i] = \text{OneVectorValue}[i]$,

где $\text{Key}[i]$ – i -й элемент строки, содержащей ключ.

Пусть имеется водяной знак, заданный матрицей, показанной ниже, элемент матрицы – координата i -го пикселя:

1	2	3
4	5	6
7	8	9

Для данной матрицы будет использован ключ длиной 3 (так как высота и ширина матрицы равна 3).

Ключ: Dos

Обратимся к таблице ASCII для того, чтобы представить сообщение соответствующими числами из этой таблицы:

- D = 104
- o = 157
- s = 163

Данные десятичные значения указывают, на сколько элементов нужно сдвинуть каждый столбец: 1 – на 104, 2 – на 117, 3 – на 123.

Для того чтобы не выполнять вручную сдвиг, можно воспользоваться формулой, приведенной выше, и узнать координаты нового места после сдвига (2-й пункт формулы сдвига столбцов).

Матрица после сдвига:

4	8	9
7	2	3
1	5	6

Данный алгоритм кодирования неэффективен, но вполне подойдет для описания процесса нанесения по ключу.

Алгоритм нанесения закодированной водермарки почти ничем не отличается от алгоритма нанесения незакодированной водермарки, добавляется лишь шаг (между 3 и 4 шагами исходного алгоритма) с кодированием изображения марки и последующим наложением закодированной марки на исходное изображение.

Декодирование марки и ее выделение. Допустим, мы получили изображение с нанесенной, закодированной маркой. Для получения изображения водяного знака необходимо применить обратный сдвиг пикселей, но так как мы заранее не знаем, где расположен водяной знак, но знаем его размер, то мы просто выделяем шумы с изображения, затем делим изображение с шумами на области, размер которых равен размеру изображения водермарки, и применяем к каждой такой области декодирование по ключу (выполняем обратный сдвиг пикселей). В результате должен получиться устойчивый образ водяного знака (рис. 4, 5).

Формула сдвига столбцов для декодирования марки:

1. Копируем значения столбца изображения:

$\text{OneVectorVaue}[i] = \text{WatermarkMatrix}[j][i]$,

где $i = 0 \div \text{WatermarkCols}$, $j = 0 \div \text{WatermarkRows}$.

2. Считаем обратный сдвиг:

$\text{Shift} = \text{WatermarkRows} - (\text{Key}[i] \% \text{WatermarkRows})$,

где $\text{Key}[i]$ – i -й элемент строки, содержащей ключ.

3. Присваиваем эти значения обратно в матрицу, учитывая сдвиг и перенос:

$\text{WatermarkMatrix}[(j + \text{Shift}) \% \text{WatermarkRows}][i] = \text{OneVectorValue}[i],$



Рис. 4. Изображение с декодированной маркой (png)



Рис. 5. Изображение с декодированной маркой (jpg)

В данной статье был рассмотрен способ нанесения устойчивого СВЗ, а также выделение его при помощи преобразований Хаара, также был рассмотрен способ кодирования марки и выделения ее по ключу. Для примера был взят простой алгоритм кодирования, но в дальнейшем можно использовать другие, более криптостойкие алгоритмы.

Библиографический список

1. Вейвлет-сжатие «На пальцах» [Электронный ресурс]. – URL: <https://habr.com/en/post/168517/>
2. Kernel image processing [Электронный ресурс]. – URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Kernel_\(image_processing\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Kernel_(image_processing)).
3. Стеганография в XXI веке. Цели. Практическое применение. Актуальность [Электронный ресурс]. – URL: <https://habr.com/en/post/253045/>
4. Haar wavelet [Электронный ресурс]. – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Haar_wavelet

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

Чекменев Андрей Владимирович – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КЗИ-16-16, г. Пермь, e-mail: spiritofice@yandex.ru

Болгов Александр Олегович – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КЗИ-16-16, г. Пермь, e-mail: aleksynderbolgov@gmail.com

Е.А. Евстифеева, А.Н. Каменских

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПОСТРОЕНИЯ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯМИ СОЦИАЛЬНОЙ СЕТИ «ВКонтакте»

Рассмотрена модель построения связей между пользователями социальной сети «ВКонтакте».

Ключевые слова: социальная сеть, пользователи, связь.

E.A. Evstifeeva, A.N. Kamensky

DEVELOPMENT OF A MODEL FOR CONSTRUCTING LINKS BETWEEN THE USERS OF THE SOCIAL NETWORK “VKontakte”

This article describes a model for building links between users of the social network VKontakte.

Keywords: social network, users, connection.

В сфере информационной безопасности много внимания уделяется человеку, как носителю информации и, прежде всего, как источнику угроз. Ненадежность персонала организаций и его информационная безграмотность становятся большей угрозой, чем возможные утечки данных по техническим каналам. Из этого следует, что сотрудников можно рассматривать в качестве источника угроз для предприятия, а значит, их необходимо проверять на наличие связей с конкурентами и злоумышленниками. Одним из способов является проверка пользователей социальных сетей.

Проверка производится лишь по тем данным, которые пользователь не закрыл настройками приватности: в случае если пользователь не предоставил доступа к своей странице, получить данные о нем не удастся.

Описание модели. Модель наличия связей позволит выявить наличие у пользователя подозрительных контактов посредством сбора данных о них из открытых источников, например социальной сети «ВКонтакте». При наличии связи со злоумышленником существует вероятность существования канала утечки информации через указанного сотрудника. Помимо прямых путей взаимодействия, между ними могут существовать косвенные. Из них будут выбраны лишь те, для которых не найдено более короткой связи. Например, при

существовании пути *сотрудник – посредник № 1 – злоумышленник*, не требуется определять связи *сотрудник – посредник № 1 – посредник № 2 – злоумышленник*, *сотрудник – посредник № 1 – посредник № 3 – злоумышленник*, *сотрудник – посредник № 1 – посредник № 2 – посредник № 3 – злоумышленник*. Полученные данные фиксируются, на их основе строится граф социальных связей.

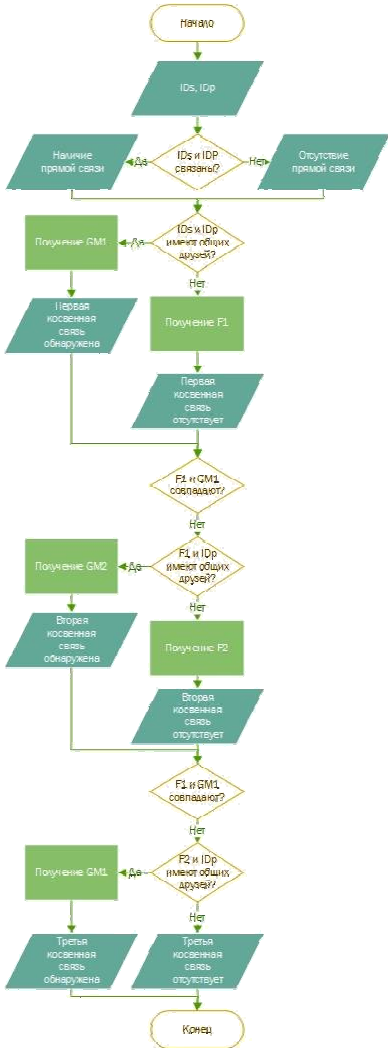


Рис. 1. Упрощенный алгоритм работы программы

Для получения данных из социальной сети программа взаимодействует с VK API. Для дальнейшего взаимодействия с программой визуализации графов Gephi производится запись в файл Excel в формате CSV.

Описание алгоритма сбора данных. Программа написана на языке Java 8 SE, сборка проекта осуществляется средствами Maven. Упрощенная схема ее функционирования представлена на рис. 1.

Разработанный алгоритм функционирует следующим образом:

Получение данных о прямых связях пользователей. Для начала необходимо получить связи типа сотрудник – злоумышленник. Используется метод API VK – friends.search. Он позволяет найти в друзьях указанного пользователя требующийся параметр – id, имя фамилию и т.п. В качестве входных параметров используем id пользователя – в его друзьях будет осуществляться поиск, и id искомого пользователя. Ответ на запрос возвращает 1 в случае обнаружения совпадения или 0 при его отсутствии.

Если запрос возвращен с ошибкой, то на экран выводится соответствующее сообщение. Одна из наиболее вероятных – отсутствие прав для доступа к аккаунтам, закрытым настройками приватности.

В случае, если ответ возвращен без ошибок и найдено совпадение, на экран выводится сообщение о найденной связи. Затем производится вывод полученных данных в файл CSV. В случае если ответ возвращает 0, сообщаем об отсутствии прямых связей.

Получение данных о косвенных связях между пользователями

1. Получение друзей проверяемого пользователя. Метод friends.get позволяет получить список друзей указанного в запросе пользователя. Входным параметром является его id, результат запроса возвращает массив id друзей пользователя.

При возвращении результативного ответа полученные данные заносятся в массив F1 – здесь содержатся друзья пользователя, чей id проверяется на наличие связей с другими пользователями.

2. Получение первой косвенной связи. На данном этапе получаем следующую связь: сотрудник – посредник – злоумышленник.

Для получения косвенных связей между пользователями воспользуемся методом friends.getMutual – он позволяет определить общих друзей между пользователями. Плюсом данного метода является то, что мы сразу получаем необходимые id. Входными параметрами являются id пользователей, между которыми необходимо установить связь.

3. Получение второй косвенной связи. Далее получаем связь *сотрудник – посредник – посредник – злоумышленник*.

Производимые действия аналогичны предыдущим, однако при наличии более короткой связи мы не производим дальнейший поиск, а переходим к следующему пользователю.

4. Получение третьей косвенной связи. Для того чтобы определить наличие косвенной связи *сотрудник – посредник – посредник – посредник – злоумышленник*, необходимо получить друзей друзей и произвести проверку на наличие более короткой связи.

Если более короткой связи еще не было найдено, то производим поиск более глубокой связи.

Обработка результатов. Собранные данные используются для построения графа связей между пользователями. Стоит отметить, что результаты кардинально отличаются при ограничении глубины поиска. Так, при ограничении поиска двумя посредниками было найдено 8 различных путей между пользователями (рис. 2).

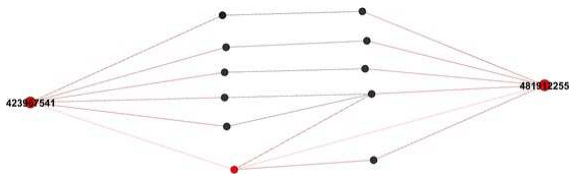


Рис. 2. Граф связей с двумя посредниками и выделением кратчайшего пути

При ограничении глубины поиска тремя пользователями было получено 1575 связей. Для их упорядочения используются встроенные инструменты программы Gephi. Примеры приводятся на рис. 3 и 4.

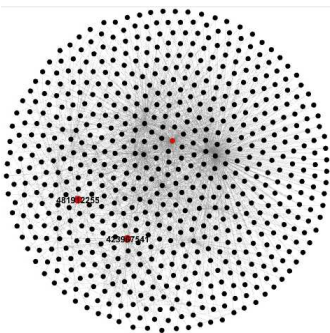


Рис. 3. Граф связей с тремя посредниками

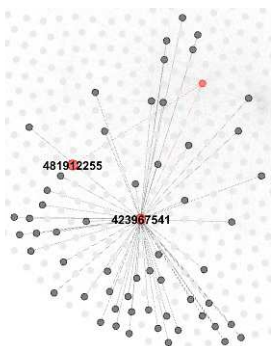


Рис. 4. Граф связей с тремя посредниками и выделением кратчайшего пути и прямых связей

Построенная модель взаимодействия пользователей позволяет установить связь между сотрудником и предполагаемым злоумышленником, отсеивая наименее вероятные из них еще на этапе сбора данных. При необходимости может осуществляться поиск на большую глубину посредников, однако, так как число обрабатываемых данных увеличивается, увеличится и время ожидания результата.

Библиографический список

1. Абрамов М.В., Азаров А.А., Фильченков А.А. Распространение социинженерной атаки злоумышленника на пользователей информационной системы, представленных в виде графа социальных связей // Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям. – СПб.: Изд-во С.-Петерб. гос. электротехн. ун-та «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 2015. – Т. 1. – С. 329–331.
2. Веденеев В.С., Бычков И.В. Средства поиска инсайдеров в корпоративных информационных системах // Безопасность информационных технологий. – М.: КЛАССное снаряжение, 2014. – Т. 21, № 1. – С. 9–13.
3. Алексеева Е.Н. Человек как угроза интересам информационной безопасности / Башкир. гос. ун-т. – Уфа, 2019.

Сведения об авторах

Евстифеева Евгения Александровна – студентка Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КЗИ-15-16, г. Пермь, e-mail: ewgenia1997@gmail.com

Каменских Антон Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: antoshkinoinfo@yandex.ru

Е.Л. Кротова, Е.Д. Томилова

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РИСКОВ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ КРИПТОВАЛЮТНОЙ БИРЖИ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Рассмотрен метод решения задачи прогнозирования временных рядов для оценки рисков информационной безопасности для криптовалютной биржи. Выполнен анализ данных, определен функционал ошибки и выполнена оценка полученных результатов с помощью соответствующих метрик качества.

Ключевые слова: криптовалютная биржа, риски информационной безопасности, прогнозирование временных рядов, линейная регрессия.

E.L. Krotova, E.D. Tomilova

FORECASTING INFORMATION SECURITY RISKS FOR A CRYPTOCURRENCY MARKET BASED ON MACHINE LEARNING ALGORITHMS

In this article a method for solving problem of forecasting time series for assessing information security risks for a cryptocurrency market was considered. The data analysis was performed, the error functional was determined, and the obtained results were evaluated using the appropriate quality metrics.

Keywords: cryptocurrency market, information security risks, time series forecasting, linear regression.

В настоящее время злоумышленники выстраивают сложные многоэтапные схемы, охватывающие все каналы воздействия на поведение покупателей и продавцов криптовалют, с целью дестабилизации рынка криптовалют и увеличения разницы в курсах криптовалют на разных биржах.

Рисками информационной безопасности для криптобиржи являются:

1. Риск эксплуатации уязвимого ПО, на основе которого криптобиржа построена как сервис.
2. Риск хищения крипто-токенов путем эксплуатации уязвимостей в коде смарт-контрактов.
3. Мошенничество на фоне постоянно меняющегося курса криптовалют на различных биржах.

Результаты прогнозирования стоимости криптовалютных пар позволят оценить риски информационной безопасности для криптовалютной биржи, связанные с изменением курса криптовалют, и могут в определении конкретных мер по управлению криптовалютой.

Для оценки и прогнозирования рисков ИБ для криптобиржи нужно определить, какие признаки и связи между ними оказывают влияние на стоимость криптовалютной пары и в какой степени.

Постановка задачи. Для выполнения прогнозирования предполагается решить следующие задачи:

- 1) выбрать семейство алгоритмов, из которого впоследствии будет выбираться лучший, и изучить, как оно устроено;
- 2) определить функционал ошибки, т.е. то, как мы будем измерять, насколько хорошо или плохо алгоритм отрабатывает на конкретной выборке;
- 3) выбрать лучший с точки зрения функционала ошибки алгоритм из всего семейства алгоритмов;
- 4) оценить с помощью метрик качества, как отработал алгоритм на тестовых данных.

Данную задачу прогнозирования временных рядов можно рассматривать как задачу регрессии, поскольку множество значений целевой переменной совпадает с множеством вещественных чисел.

Задача простой линейной регрессии состоит в том, чтобы смоделировать связь между единственным признаком x и непрерывным значением отклика y . Уравнение линейной модели с одной объясняющей переменной определяется следующим образом:

$$y_0 = w_0 + w_1x.$$

Линейная регрессия понимается как нахождение оптимально подогнанной прямой линии, проходящей через точки образцов данных.

Зависимость только от одной переменной, как правило, можно изучить только в искусственно созданных условиях. На практике на явление или процесс оказывают влияние несколько факторов, и это влияние неодинаково. Исходя из этого мы можем разделить линейную регрессионную модель на две и более объясняющие переменные и получить множественную линейную регрессию:

$$y_0 = w_0x_0 + w_1x_1 + \dots + w_mx_m = \sum_{i=0}^m w_ix_i.$$

Для построения модели были использованы данные криптовалютной пары ETH/BTC с биржи Binance за 1-й квартал 2018 г.

Признаки, влияние на целевую переменную которых учитывалось, следующие: open – цена на начало временного интервала, high – максимальная цена за период, low – минимальная цена за период, volume – количество проданной и купленной криптовалюты за период, quote asset volume – объем используемых активов в данный период, number of trades – количество сделок за период.

Целевой переменной, для которой будет выполняться прогнозирование, является переменная Close, показывающая цену на конец периода. Период – 1 мин.

Анализ данных

Первым этапом анализа данных является их визуализация, с помощью которой мы можем установить наличие выбросов, распределение данных и связи между ними. Для этого создадим матрицу точечных графиков (рис. 1). По ней мы видим, что параметры Volume и Quote asset volume имеют выбросы. Существует линейная связь между ценой на конец интервала и параметрами open, low, high.

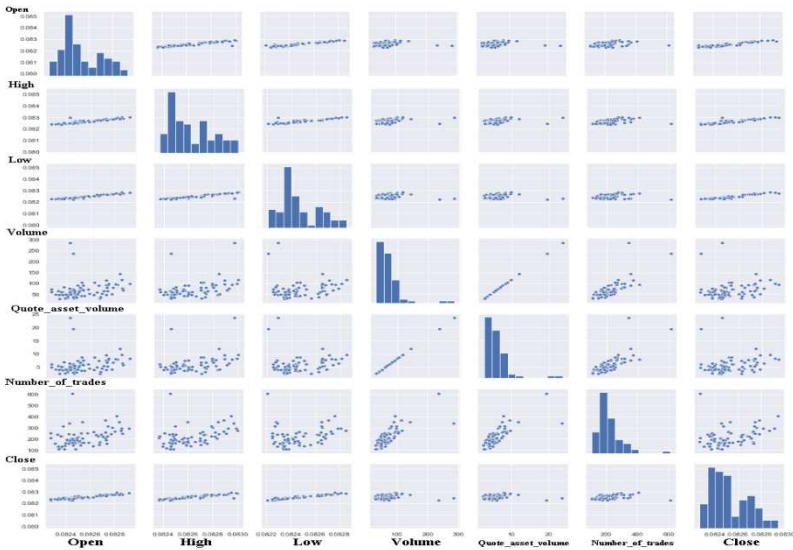


Рис. 1. Матрица точечных графиков

Переменная Close, похоже, нормально распределена, но содержит несколько выбросов. Для того чтобы определить силу корреляционной связи между двумя показателями, создадим корреляцион-

ную матрицу. Корреляционная матрица – это квадратная матрица, которая содержит линейные коэффициенты корреляции Пирсона, которые измеряют линейную зависимость между парами признаков. Коэффициенты корреляции находятся в диапазоне от -1 до 1 . Два признака имеют абсолютно положительную корреляцию, если коэффициент корреляции Пирсона равен 1 ; никакой корреляции, если 0 , и абсолютно отрицательную корреляцию при -1 . Создадим корреляционную матрицу в виде теплокарты (рис. 2).

При построении линейной регрессионной модели нас интересуют те признаки, которые имеют высокую корреляцию с нашей целевой переменной Close. По приведенной ниже корреляционной матрице видно, что переменная Close показывает наибольшую корреляцию с переменной Low.

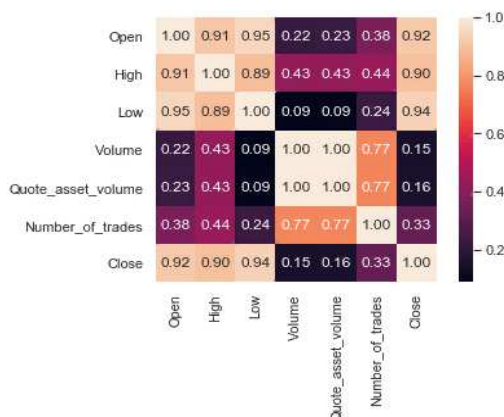


Рис. 2. Корреляционная матрица

Функционал ошибки. Качество алгоритма a измеряется с помощью функционала ошибки Q , который принимает на вход алгоритм и выборку, на которой измеряется качество этого алгоритма. Процесс обучения заключается в поиске такого алгоритма из семейства алгоритмов A , который минимизирует функционал ошибки:

$$a(x) = \operatorname{argmin} Q(a, X), \text{ где } a \in A.$$

Будем минимизировать среднеквадратичную ошибку, которая имеет вид

$$Q(a, X) = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l (a(x_i) - y_i)^2.$$

Минимизировать данную ошибку можно при помощи подбора оптимальных весовых коэффициентов.

Метод обучения. Для поминутного прогнозирования было взяты 75 наблюдений. Мы можем посмотреть основные статистические характеристики этих данных (рис. 3) по каждому числовому признаку, а именно количество непропущенных значений, среднее, стандартное отклонение, медиану, 0,25 и 0,75 квантили.

	Open	High	Low	Close	Volume	Quote_asset_volume	Number_of_trades
count	75.000000	75.000000	75.000000	75.000000	75.000000	75.000000	75.000000
mean	0.082539	0.082619	0.082461	0.082527	69.066667	5.742435	216.946667
std	0.000164	0.000171	0.000160	0.000162	39.396918	3.256076	78.197237
min	0.082275	0.082366	0.082208	0.082270	29.000000	2.433828	108.000000
25%	0.082422	0.082481	0.082351	0.082395	48.500000	4.026556	169.000000
50%	0.082479	0.082566	0.082420	0.082479	60.000000	4.990289	199.000000
75%	0.082676	0.082739	0.082622	0.082638	80.000000	6.642434	247.000000
max	0.082925	0.082999	0.082850	0.082946	285.000000	23.595845	609.000000

Рис. 3. Статистические характеристики данных

Данные были разбиты на обучающую и тестовую выборки. В обучающую выборку вошло 53 наблюдения, а в тестовую – 22. Попадаем на вход модели линейной регрессии обучающий набор данных и значения целевой переменной на этих данных. В модели линейной регрессии среднеквадратичная ошибка минимизируется с помощью такого алгоритма оптимизации весов, как градиентный спуск. Градиентный спуск работает следующим образом:

1) мы определенным образом инициализируем вектор весов, например нулями;

2) затем в цикле повторяется градиентный шаг до наступления сходимости. Из текущего приближения вектора весов вычитается градиент, т.е. функционал ошибки в этой точке с некоторым коэффициентом, который выбирается таким образом, чтобы шаг не был слишком большим и мы не пропустили точку минимума функции ошибки. Сходимость наступает, когда вектор весов перестает меняться слишком сильно от одной итерации к другой.

Для переменных были получены следующие весовые коэффициенты:

–0,10822959 для open, 0,34592679 для high, 0,654910185 для low, $4,65253497 \cdot 10^{-5}$ для volume, $-5,74894167 \cdot 10^{-4}$ для quote asset volume и $5,6270288 \cdot 10^{-7}$ для number of trades. Модель определила, что количе-

ство сделок – это наименее информативный признак, а минимальная цена за период – наиболее информативный. Учитывая, что модель использует шесть объясняющих переменных, мы не можем представить гиперплоскость на двумерном графике, но можно вывести на график остатки в сопоставлении с предсказанными значениями (рис. 4).

Среднеквадратичная ошибка на тренировочном наборе данных равна $1,85 \cdot 10^{-9}$, а на тестовом $4,656 \cdot 10^{-9}$.

Иногда может быть более целесообразным сообщить о коэффициенте детерминации (R^2) для лучшей интерпретируемости качества модели. R^2 – это доля дисперсии отклика, которая охвачена моделью. Значение R^2 определяется следующим образом:

$$R^2 = 1 - \frac{\frac{1}{l} \sum_{i=1}^l (y^{(i)} - \hat{y}^{(i)})^2}{\frac{1}{l} \sum_{i=1}^l (y^{(i)} - \mu_y)^2}.$$

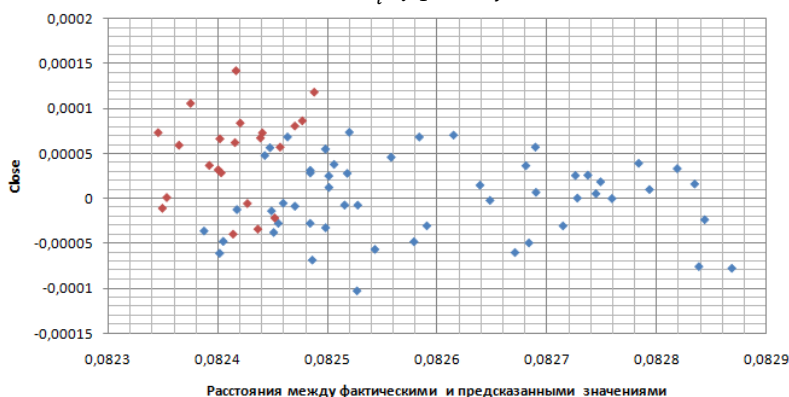


Рис. 4. График остатков

Для тренировочного набора данных коэффициент детерминации R^2 ограничен значениями между 0 и 1, но может стать отрицательным для тестового набора. Если $R^2 = 1$, то модель идеально аппроксимирует данные. После оценивания на тренировочных данных коэффициент детерминации R^2 множественной регрессионной модели составляет 0,909, что является очень хорошим результатом. Однако R^2 на тестовом наборе данных составил всего 0,478.

Модель множественной линейной регрессии – это модель, которая в силу своей простоты обладает такими преимуществами, как легкая масштабируемость, интерпретируемость, также для этой

модели требуется небольшое время для ее обучения. С помощью данной модели мы можем осуществлять точечные прогнозы и иметь представление об общей ценовой динамике. Для долгосрочного прогнозирования данная модель не подходит.

Библиографический список

1. Рашка С. Python и машинное обучение / пер. с англ. А.В. Логунова. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 418 с.
2. Мюллер Ан., Гвидо С. Введение в машинное обучение с помощью Python. – М.: Самиздат, 2017. – 393 с.
3. Бринк Х., Ричардс Д., Феверолф М. Машинное обучение. – СПб.: Питер, 2017. – 336 с.

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

Томилова Екатерина Дмитриевна – студентка Пермского национального исследовательского политехнического университета электротехнического факультета, гр. КЗИ-15-1б, г. Пермь, e-mail: katerina.tomilova@protonmail.com

А.С. Шабуров, А.И. Шлыков, Н.Э. Двойнишников

АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ МЕТОДОВ ЗАЩИТЫ ВЕБ-СТРАНИЦ И ПРИЛОЖЕНИЙ ОТ ВРЕДОНОСНОЙ АКТИВНОСТИ

Приводится метод защиты от вредоносной активности веб-страниц и приложений, основанный на использовании honeypot thug. Данный метод позволяет находить вредоносный код веб-страниц и структурно исследовать его на наличие вредоносной активности и других возможностей атаки пользовательского клиента. Детально рассмотрены этапы исследования вредоносного кода, а также проведено сравнение предложенного метода с другими методами решения данной проблемы.

Ключевые слова: honeypot, вредоносный код, метод защиты от вредоносной активности, перенаправление, пользовательский клиент.

A.S. Shaburov, A.I. Shlykov, N. Dvoinishnikov

ANALYSIS OF THE MAIN METHODS OF PROTECTING WEB PAGES AND APPLICATIONS FROM MALICIOUS ACTIVITY

The article provides a method of protection against malicious activity of web pages and applications, based on the use of thug honeypot. This method allows to find the malicious code of web pages and structurally investigate it for the presence of malicious activity and other attack possibilities of the user client. The stages of the study of malicious code are considered in detail, and the proposed method is compared with other methods for solving this problem.

Keywords: honeypot, malicious code, method of protection against malicious activity, redirection, user client.

На сегодняшний день вряд ли можно найти хоть одного человека, который никогда бы не сталкивался с вредоносными веб-страницами и приложениями. И если продвинутый пользователь, подозревающий, что страница может быть потенциально вредоносной, обратится к самостоятельному поиску вредоносного кода, подозрительных ссылок и перенаправлений в HTML-коде страницы, то рядовому пользователю браузера в силу отсутствия знаний в данной области это не предоставляется возможным. Кроме того, вариант самостоятельного поиска не является целесообразным, поскольку современные веб-страницы и веб-приложения представляют собой сотни строк кода. Исходя из этого можно считать, что нахождение пути

защиты от атак со стороны веб-страниц и приложений является актуальной проблемой, задача автоматизации которой также актуальна. В данной статье речь пойдет о защите от подобных атак с использованием honeypot-ловушек со стороны клиента, а также о разработанном методе расследования возможных инцидентов безопасности.

honeypot – это механизм компьютерной безопасности, предназначенный для обнаружения, отклонения или в некотором роде противодействия попыткам несанкционированного использования информационных систем [1]. Структура типичного расположения honeypot в сети показана на рис. 1.

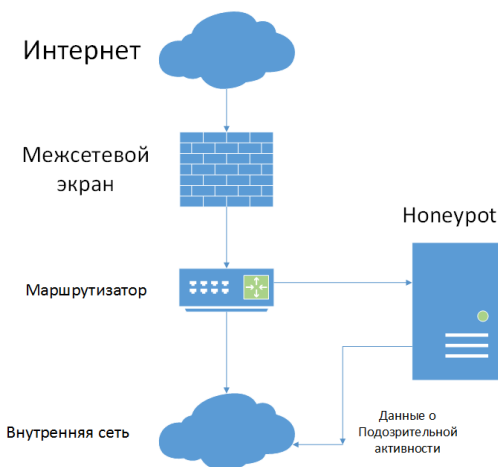


Рис. 1. Схема типичного расположения honeypot в информационной системе

Существует два основных вида honeypot [2] – активные и пассивные. Наиболее распространенной системой является пассивный honeypot. Работает он так: honeypot находится рядом с легальным ресурсом и никем не используется, никто о нем не знает. Соответственно, если кто-то получил доступ к этому honeypot, то он и является злоумышленником, поскольку для других пользователей этот сервис бесполезен и, более того, недоступен. Активные honeypot – более сложные механизмы, которые сами ищут опасные ресурсы и представляются под их атаки. Цель у обоих видов одна – своевременно обнаружить возможную атаку и дать время и почву для анализа атаки злоумышленником [3].

В настоящее время доступно большое число различных honeypot-сервисов различной направленности: виртуальные машины, приложения и т.д. Все возможные варианты ловушек для злоумышленников представлены на таких ресурсах, как сайт [4]. В данной работе будет использоваться honeypot thug (с англ. «головорез») – это активный honeypot (client honeypot), который представляет собой веб-клиент, к которому можно применить любую оболочку реально существующих веб-браузеров для исследования влияния потенциально вредоносных веб-страниц и приложений.

Предложенный в статье метод берет готовый инструмент, но оптимизирует работу с ним, позволяет использовать его пошагово и рационально, обеспечивая комплексный подход к решению проблемы анализа вредоносной активности. Именно в этом заключается новизна данного исследования.

Анализ средств защиты от вредоносных веб-страниц и приложений. Существует достаточно путей защиты от проблемы перехода по вредоносным веб-ссылкам, но у них, к сожалению, существуют свои недостатки.

1. BGP- и DNS-blackholing, позволяющий фильтровать домены с плохим рейтингом. Минусом является то, что при использовании однозначной блокировки подозрительного домена теряется доступ к другим частям этого домена, которые, возможно, не были заражены.

2. Антивирусы с использованием спам-фильтрации. Этот способ использует различные методы, в том числе блокирование DNS, фильтрацию контента и проч. Но во многих случаях антивирусное средство является платным и его настройка также целиком и полностью зависит от пользователя.

3. Программное обеспечение IDS / IPS, позволяющее определять вредоносные ссылки по сигнатурам. Минус состоит в том, что многие из этих сигнатур нужно также настраивать самому, а сложность этой настройки несравненно выше, чем у антивирусов и honeypot.

Таким образом, актуальной задачей будет являться разработка метода, лишенного недостатков имеющихся методик анализа вредоносной активности веб-страниц и приложений. Очевидно, что описанные выше средства по тем или иным причинам не подходят для точного анализа вредоносной страницы, не предоставляют необходимой информации и обладают высокой стоимостью и сложностью настройки. Ввиду этого предложенный метод должен избегать подобного рода недостатков.

Защита клиентского ПК с помощью honeypot. Исследование вредоносного сайта. Работа состоит из одного сценария, разделенного на две отдельные задачи: развертывание honeypot клиента и анализа сайта www, который считается вредоносным.

В статье будет использоваться приманка для злоумышленников, так называемый honeypot. Thug – клиент honeypot с низким уровнем взаимодействия, ориентированный на обнаружение вредоносных веб-страниц, эмулирующий поведение типичного веб-браузера [5] Инструмент использует движок Google V8 JavaScript и реализует свою собственную объектную модель документа (DOM). Thug написан на Python и доступен в соответствии с GNU General Public License.

Первая задача – это развертывание самого инструмента. Все шаги установки взяты из документации, предоставленной разработчиками thug [6]. Все необходимые репозитории копируются в каталог /opt/.

Пошаговая демонстрация метода исследования вредоносного кода с помощью honeypot thug. Для решения этой задачи необходимо запустить веб-сервер Apache. По сценарию, происходит обнаружение потенциально вредоносной страницы (администратором сети или обычным пользователем), которую необходимо исследовать с помощью thug, развернутого в предыдущей задаче.

Предлагаемый метод состоит из пяти шагов, выполнение которых необходимо для точного анализа любого подозрительного кода. Число шагов вариативно, но общий подход к решению подобной задачи не отличается от предложенного нами.

Шаг 1. Необходимо запустить honeypot thug, для чего выполним его загрузку и проверку опций, доступных при работе с ним.

Шаг 2. С помощью thug изучается подозрительный URL (из отчета об инциденте). На этом этапе происходит полное сканирование thug подозрительного URL и формируется полный отчет после проверки.

Шаг 3. Проверка журнала анализа thug. Полный путь к журналу отображается в последней строке стандартного вывода. Этот путь отличается в каждом случае, поэтому нужен тот, который сгенерировался в момент проверки. Доступны два вида журналов: полнофункциональные веб-страницы в виде простых текстовых/HTML-файлов и полные результаты анализа (с содержанием) в одном XML-файле (MITER MAEC4 формат входа).

Обратим внимание, что в данном шаге thug использует браузер Internet Explorer 6.1 (это может быть любой другой браузер, суть

в том, что в дальнейшем будет необходима проверка с помощью других оболочек браузеров).

Шаг 4. Следующим шагом должен стать повтор всего анализа с использованием другой оболочки thug (в примере это будет браузер Internet Explorer 7). Нужно отметить, что, если JavaScript не читается из-за особенностей используемого браузера, необходимо выполнить анализ страницы, используя все доступные на машине браузеры. Чтобы запустить thug под оболочкой IE7, используем опцию `-u winxprie70`.

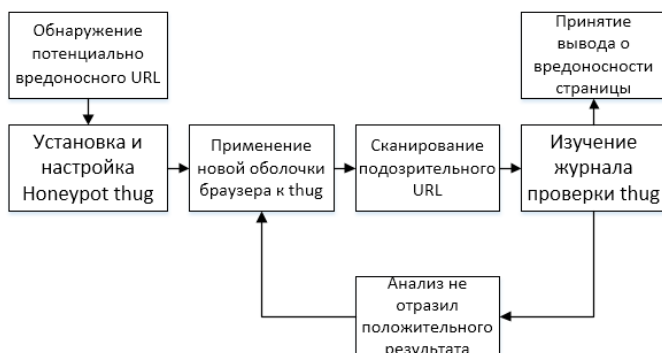


Рис. 2. Алгоритм метода исследования вредоносной страницы с помощью honeypot thug

Результатом данного шага должен стать подробный отчет thug, аналогичный шагу 2, но выполненный под другой оболочкой.

Шаг 5. В этом шаге мы, подобно 3-му шагу, анализируем журнал thug, который он создал после анализа потенциально вредоносной страницы. На этом шаге пристальное внимание стоит уделять изменениям в отчете по сравнению с 3-м шагом.

Если такие изменения есть, их необходимо зафиксировать и тщательно проанализировать. Эти изменения означают, что эксплойт предназначался именно для этого браузера. Если изменений в журнале не произошло, при этом URL кажется безвредным, то это не причина прекращать проверку – анализ thug должен производиться на всех возможных оболочках, пока не будет найден эксплойт или, наоборот, не подтвердится злонамеренность страницы. Соответственно, дальнейшая работа связана с повторением шагов 2 и 3. Если все оболочки thug были использованы, но вредоносный код так и не

был обнаружен, делается вывод об отсутствии вредоносного содержания в исследуемом URL.

На основе исследования подозрительного URL с помощью honeypot thug был составлен алгоритм метода исследования потенциально вредоносного кода, представленный на рис. 2.

В данной статье приведено решение проблемы, связанной с вредоносными веб-страницами и приложениями, путем которых происходит заражение компьютера клиента. В качестве решения проблемы был использован honeypot thug, позволяющий проанализировать подозрительный код. Данное средство позволило разработать представленный в статье метод исследования такого рода вредоносных страниц. С помощью предложенного метода можно максимально подробно и полноценно проанализировать любой код и результативно обнаружить находящийся в нем вредоносный. В конце исследования было произведено сравнение предложенного метода с другими методами защиты от вредоносных атак, выявлены преимущества и недостатки методов.

Главный вывод должен быть следующий: нет идеального и абсолютно эффективного решения для ликвидации подобных атак. Метод с использованием honeypot позволяет вовремя обнаружить и зарегистрировать подозрительную активность, а также исследовать ее для дальнейших действий, при этом он отличается дешевизной и подробностью, а также возможностью подхода к проблеме с разных сторон, что отличает его от других, более известных методов защиты. Он отличается дешевизной (все инструменты бесплатны), возможностью подробного анализа и простотой установки и настройки. Таким образом, предложенный метод полностью удовлетворяет потребности в защите веб-страниц и приложений от вредоносной активности.

Библиографический список

1. The HoneyNet Project. Know your enemy: learning about security threats. – Addison-Wesley, 2004.
2. Provos N., Holz T. Virtual honeypots: from botnet tracking to intrusion detection. – Addison-Wesley Professional, 2007.
3. Lance Spitzner. Honeypots: tracking hackers. – Addison-Wesley, 2002.
4. The HoneyNet Project: офиц. сайт. – URL: <https://www.honeynet.org/> (accessed 15 January 2019).

5. Thug python low-interaction honeyclient on GitHub. – URL: <https://github.com/buffer/thug> (accessed 15 January 2019).

6. Build and Install Thug. Github. – URL: <https://buffer.github.io/thug/doc/build.html> (accessed 15 January 2019).

Сведения об авторах

Шабуров Андрей Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: shans@at.pstu.ru

Шлыков Алексей Игоревич – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: thekingofthedas@gmail.com

Двойнишников Николай Эдуардович – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: rerfrerf00@gmail.com

А.И. Князев, А.Н. Кокоулин

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ЛИЦ

Описывается новый подход в создании систем видеонаблюдения с распознаванием лиц. Такой подход был назван иерархической системой распознавания лиц. Он позволяет снизить нагрузку на сервер системы видеонаблюдения, уменьшить количество передаваемого на сервер видеотрафика и увеличить качество ROI для распознавания лиц. Предложены методы оптимизации поиска силуэтов человека на изображении.

Ключевые слова: видеонаблюдение, поиск силуэтов, распознавание лиц, детекция движения, трафик.

A.I. Knyazev, A.N. Kokoulin

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF FACE RECOGNITION SYSTEMS

This article describes a new approach to building video surveillance systems with face recognition. This approach was called a hierarchical system of facial recognition. It allows to: reduce the load on the video surveillance system server, reduce the amount of video traffic transmitted to the server, and increase the quality of ROI for face recognition. Methods are proposed for optimizing the search of human silhouettes in the image.

Keywords: video surveillance, search for silhouettes, face recognition, motion detection, traffic.

Современные системы видеонаблюдения могут содержать десятки или даже сотни камер видеонаблюдения. С ростом количества камер возрастают и требования к серверу. Серверу необходимо обрабатывать информацию со всех камер, подключенных к нему. Наличие системы распознавания поднимает планку требований к серверу еще выше.

Решить эту проблему позволяет иерархический метод распознавания лиц. Суть данного метода – частичный перенос вычислений с сервера на микроконтроллеры. Микроконтроллеры подключаются напрямую к камере или группе камер. Изображения с камер поступают на микроконтроллеры. Микроконтроллеры принимают изображения, детектируют движение в кадре. В найденных областях микро-

контроллеры ищут силуэты людей. Затем области изображений с силуэтами людей отправляются на сервер.

Преимущества иерархической системы распознавания лиц:

1. Уменьшение нагрузки на сервер. Перенос части вычислений на микроконтроллеры значительно снижает нагрузку на сервер. При данном подходе в задачи сервера больше не входит анализ всей картинки. Задача поиска силуэта человека полностью ложится на микроконтроллер.

Сначала определяется, где на изображении есть движение. Это позволяет повысить скорость работы алгоритмов поиска силуэта. Обрабатывается не все изображение, а лишь определенные области. Области без движения закрашиваются в черный. Это позволяет повысить точность поиска.

В обнаруженных областях осуществляется поиск силуэтов людей. Это делается раз в несколько кадров. За счет этого снижается нагрузка на микроконтроллер. Также повышается скорость обработки информации.

В качестве алгоритма поиска силуэта используются каскады Хаара. Это связано с тем, что они работают значительно быстрее, чем нейронные сети и Ног-дескриптор. При этом каскады Хаара не сильно уступают в точности. В то же время каскады можно улучшать, увеличивая обучающий датасет.

Обнаруженный силуэт отслеживается на видеопотоке с помощью алгоритмов трекинга. Такие алгоритмы значительно меньше нагружают микроконтроллер и достаточно быстры. Благодаря этому можно передавать на сервер информацию о перемещении человека в кадре. Полученная информация позволит прогнозировать, в кадре какой камеры появится человек, если выйдет из зоны видимости текущей камеры.

Кроме того, отслеживание силуэта человека позволяет из нескольких снимков одного человека выбрать наиболее четкий. Для этого используются специальные алгоритмы, определяющие, насколько изображение «смазано». Кадры с изображением одного и того же человека не перемешиваются с другими.

Изображения, полученные после обработки микроконтроллером, передаются на сервер. На сервере происходит распознавание силуэта с целью определить личность человека.

Как видно, значительная часть вычислений переносится с сервера на микроконтроллеры. Кроме того, такой подход позволяет снизить затраты на сервер. Покупка микроконтроллеров выйдет значительно дешевле, чем покупка более мощного сервера.

2. Уменьшение трафика. Современные камеры видеонаблюдения осуществляют передачу видеопотока на сервер непрерывно. Большое количество камер создает большой поток видеотрафика, который сервер должен принять, а затем обработать.

Иерархический подход позволяет существенно снизить трафик передаваемой информации. Это достигается за счет того, что передается не все изображение целиком, а лишь те его области, где обнаружен силуэт человека. В зависимости от расположения камеры и ее разрешения можно снижать трафик более чем на 90 %. Если же в кадре нет людей, то нет и трафика (100%-ное снижение трафика).

При необходимости видеть весь кадр целиком раз в определенный интервал времени на сервер можно передавать всю картинку целиком. Затем полученные области с силуэтами и их координаты передавать на сервер и накладывать на большое изображение. Даже при этом трафик будет значительно уменьшен (рис. 1).

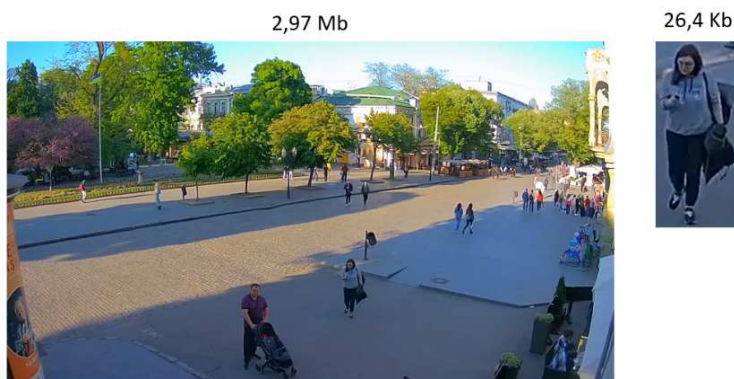


Рис. 1. Пример снижения трафика

3. Возможность повышения качества ROI. Чем ниже разрешение камеры, тем ниже и разрешение области изображения с силуэтом человека. Для качественной идентификации личности необходимо изображение в хорошем разрешении. Иерархический метод позволяет решить и эту проблему.

За счет того, что передаваемый видеотрафик с камер значительно уменьшается, можно поставить камеры с большим разрешением, чем те, что есть. Таким образом, получаемые области с силуэтами людей будут иметь большее разрешение (рис. 2).

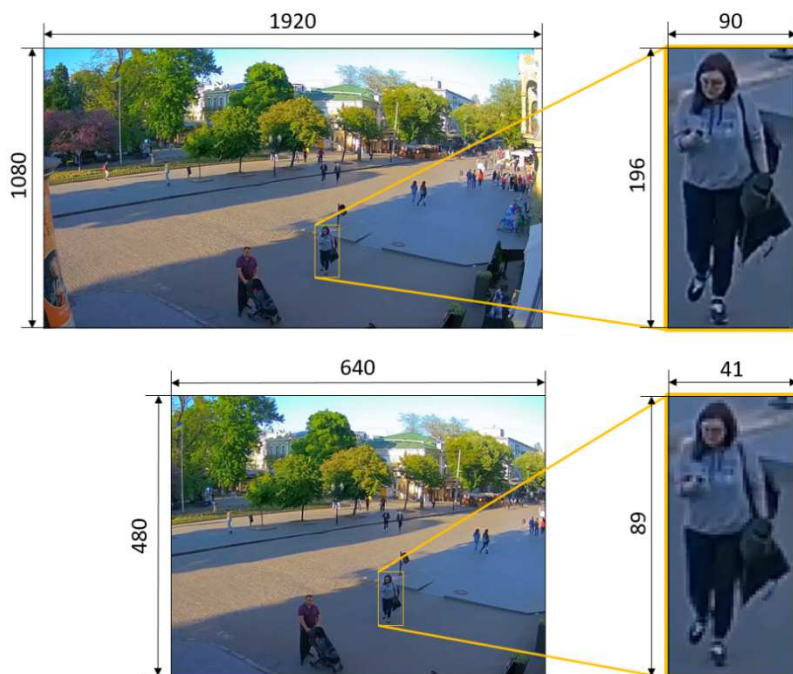


Рис. 2. Пример влияния разрешения камеры на ROI

Традиционный подход использует централизованную схему системы распознавания, которая имеет высокую нагрузку на сеть и вычислительную нагрузку на центральный сервер распознавания: чем больше камер видеонаблюдения обслуживает центральный блок, тем больше его загрузка, даже если исходный видеопоток не содержит лица и силуэты, вычислительные ресурсы тратятся впустую. Основным принципом предложенной системы распознавания является распределенная иерархическая сеть обработки, использующая парадигму исследования «от грубого к точному». Каждый исходный видеопоток обрабатывается микроконтроллерами и определяет наличие лиц или силуэтов в видеокадре и обрезает границы области интереса.

Результирующий поток, состоящий из ROI, передается на основной сервер, только если лица/фигуры обнаружены, и на следующем этапе выполняется распознавание лица. Потребление трафика снижается на 80–90 %. Предложенный в статье метод позволяет значительно улучшить современные системы видеонаблюдения.

Библиографический список

1. Hierarchical convolutional neural network architecture in distributed facial recognition system / A.N. Kokoulin, A.I. Tur, A.A. Yuzhakov, A.I. Knyazev // Proceedings of the 2019 IEEE Conf. of Rus. Young Res. in Electrical and Electronic Eng., ElConRus. – 2019.

2. Князев А.И., Кокоулин А.Н. Анализ быстродействия нейронной сети mobilenet при программной реализации на языках Python и C++ с использованием библиотеки opencv в области информационной безопасности // Автоматизированные системы управления и информационные технологии: материалы всерос. науч.-техн. конф.: в 2 т. – Пермь, 2018. – С. 355–359.

3. Тур А.И., Кокоулин А.Н. Применение каскадов Хаара для распознавания объектов // Автоматизированные системы управления и информационные технологии: материалы всерос. науч.-техн. конф.: в 2 т. – Пермь, 2018. – С. 98–103.

4. Самое главное о нейронных сетях. Лекция в «Яндексе» [Электронный ресурс]. – URL: <https://habrahabr.ru/company/yandex/blog/307260/> (дата обращения: 3.05.2019).

5. Обучение OpenCV каскада Хаара. – URL: <https://m.habr.com/ru/post/208092/> (дата обращения: 19.05.2019).

Сведения об авторах

Князев Александр Игоревич – студент Пермского национально-исследовательского политехнического университета, гр. КЗИ-15-16, г. Пермь, e-mail: knxandr@rambler.ru

Кокоулин Андрей Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: liga_asu@mail.ru

П.Д. Субботина, И.И. Безукладников

**МЕТОДЫ НЕЯВНОЙ АУТЕНТИФИКАЦИИ
И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ КОМПЛЕКСНОЙ
ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

Рассмотрена технология неявной аутентификации. Проанализирована ее актуальность и новизна. Указаны методы, используемые при реализации технологии, описаны варианты реализации.

Ключевые слова: биометрические данные, мобильные устройства, неявная аутентификация.

P.D. Subbotina, I.I. Bezukladnikov

**METHODS OF IMPLICANT AUTHENTICATION
AND THEIR APPLICATION IN PROVIDING COMPLEX
INFORMATION SECURITY**

In this article the implicit authentication technology are considered. Analyzed its relevance and novelty. The methods used in the implementation of the technology are indicated; implementation options are described.

Keywords: biometrics data, mobile device, implicit authentication.

В настоящее время повсеместное использование мобильных устройств позволяет пользователям получать доступ к множеству новых приложений, услуг и данных. Все больше и больше личной информации хранится на персональных устройствах (например, смартфонах) или доступно через них, что повышает удобство работы пользователей и создает новые возможности как для потребителей, так и для поставщиков услуг. Однако такой доступ к множеству приложений через персональные устройства также ставит новые задачи перед поставщиками услуг, которые теперь должны защищать доступ с самых разнообразных устройств. Более того, постоянно растет число мобильных вредоносных программ и других угроз безопасности для мобильных устройств. Таким образом, важно, чтобы эти мобильные устройства были оснащены надежными средствами аутентификации и авторизации. Однако, как правило, эти мобильные устройства имеют ограниченные вычислительные возможности и возможности

взаимодействия. Кроме того, пользователи мобильных устройств хотя и имеют высокий уровень безопасности при минимальном участии с их стороны, так как ввод сложного пароля с мобильного устройства является весьма трудозатратным действием, а постоянные запросы на ввод пароля могут склонить пользователя к отказу от использования приложения. Произвести же только одну проверку аутентификации пользователя не позволяет тот факт, что мобильные устройства ввиду небольшого размера, веса, удобства переноски подвержены потерям и кражам и чаще выходят из строя [1].

Все традиционные системы аутентификации выполняют функцию разграничения понятий «свой» и «чужой» на основе предъявления субъектом секрета (ключа, пароля и т.п.) или биометрических данных. При этом не учитывается, что авторизованный пользователь может являться нарушителем. В настоящее время отмечается тенденция, которая характеризуется стремлением разработчиков уменьшить число действий, совершаемых пользователем для проведения аутентификации, чтобы в конечном итоге сделать ее незаметной, «скрытой» и проводить ее непрерывно в процессе работы пользователя в компьютерной системе, параллельно осуществляя распознавание потенциально опасного для информационной безопасности поведения. Наиболее эффективным для этой цели полагается использование различных биометрических характеристик пользователя. Одним из основных факторов, обуславливающих такой выбор, является возможность организации процесса получения таких характеристик незаметно для пользователя.

Поскольку данная технология новая и только начинает развиваться, стандарта пока нет. Следовательно, нет конкретного названия. В разных работах встречаются следующие термины: frictionless [1], непрерывная аутентификация [2], скрытая аутентификация [3] и т.д.

Для скрытой аутентификации применимы поведенческие характеристики, так как при их использовании пользователю не потребуется совершать каких-либо дополнительных действий (не нужно считывать отпечаток пальца или радужку глаза), они просты в реализации, имеют низкую стоимость. Ниже представлено описание существующих систем скрытой аутентификации.

SmartAuth – гибкая и ненавязчивая схема аутентификации, которая предлагает повышенную и адаптивную безопасность с возможностью периодической аутентификации пользователя в течение дня,

чтобы поддерживать уверенность в подлинности пользователя. SmartAuth обеспечивает простоту использования благодаря контекстной аутентификации с нулевым взаимодействием с поддержкой согласия конечного пользователя о том, какие атрибуты контекстной информации собираются и обрабатываются [2].

NoPassword позволяет корпоративным клиентам и сотрудникам входить во все свои учетные записи, приложения и устройства, используя биометрию (лицо, голос, отпечатки пальцев, радужную оболочку и поведение) и другие скрытые функции, извлеченные из их телефона. Это означает, что нет аутентификации, нет ручного ввода паролей [4].

Frictionless Authentication System (FAS), которая позволяет пользователям аутентифицировать себя с помощью своих устройств для сторонних поставщиков услуг без преднамеренного выполнения каких-либо конкретных действий, связанных с аутентификацией [1].

Существует постоянный поиск более надежных систем аутентификации, которые в то же время не требуют от пользователя дополнительных действий. В настоящее время на корпоративный рынок внедряются системы аутентификации, которые используют контекстную и поведенческую информацию о пользователе. Однако независимо от технологических достижений, связанных с использованием мобильных устройств для аутентификации пользователя, внедрение неявной аутентификации будет успешным только тогда, когда будет найден правильный баланс между удобством использования, безопасностью и конфиденциальностью, отвечающий требованиям широкого круга пользователей.

Библиографический список

1. Frictionless authentication systems: Emerging trends, research challenges and opportunities // T. Van Hamme, V. Rimmer, D. Preuveneers [et al.] // 11th Int. Conf. on Emerging Sec. Inf., Syst. and Techn. (SECURWARE'17). IARIA. – 2017. – URL: <https://arxiv.org/pdf/1802.07233.pdf> (accessed 19 May 2019).

2. Preuveneers D., Smartauth W.J. Dynamic context fingerprinting for continuous user authentication // Proceed. of the 30th Annual ACM Symp. on Appl. Comp. – New York: ACM, 2015. – P. 2185–2191.

3. Гончаров П.И. Использование дополнительной скрытой аутентификации при вводе учетных данных для выявления фактов работы за чужим рабочим местом // Вестник экономической интеграции. – 2013. – № 9(66).

4. NoPassword // Cybersecurity Excellent Awards. – URL: <https://cybersecurity-excellence-awards.com/candidates/nopassword> (accessed 19 May 2019).

Сведения об авторах

Субботина Полина Дмитриевна – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КЗИ-18-1м, г. Пермь, e-mail: polyuch@gmail.com

Безукладников Игорь Игоревич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: corrector@at.pstu.ru

Е.С. Епанов, А.Н. Каменских

ОБЗОР УЯЗВИМОСТЕЙ В ОЗУ ПОД УПРАВЛЕНИЕМ ОПЕРАЦИОННЫХ СИСТЕМ НА АРХИТЕКТУРЕ WINDOWS NT

Целями работы являются изучение уязвимости данных приложений и операционных систем; создание рабочего прототипа программы для поиска, чтения и редактирования данных приложений.

Ключевые слова: уязвимость ОЗУ, C#, Windows API, kernel32.

E.S. Efanov, A.N. Kamensky

AN OVERVIEW OF THE VULNERABILITIES IN THE RAM UNDER THE OPERATING SYSTEM ON THE ARCHITECTURE OF WINDOWS NT

The purpose of this work is to study the vulnerability of these applications and operating systems. Create a working prototype of the program for searching, reading and editing application data.

Keywords: vulnerability of RAM, C#, Windows API, kernel32 library.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- 1) рассмотреть принципы взаимодействия операционной системы с ОЗУ;
- 2) дать описание интересующей нас уязвимости;
- 3) создать рабочий прототип в качестве лабораторного стенда с целью наглядной демонстрации алгоритма использования уязвимости.

Современные системы используют сложную организацию данных, и большинство уязвимостей на высоком уровне абстракции закрыты от использования эксплойтов, поэтому злоумышленники изыскивают пути для работы на более низких уровнях. Один из возможных вариантов – это работа с данными на уровне ядра ОС. Приложения, работающие на платформах x86/x86-64, многопоточны и используют клиент-серверную модель, в которой приложения пользовательского режима (клиенты) выполняются независимо друг от друга и вызывают ядро ОС при намерении работать с ресурсом, управляемым

системой. Механизм, используемый кодом режима пользователя для вызова заранее определенного набора функций ядра ОС, называется системным вызовом (system calls). Типичный системный вызов показан на рис. 1.

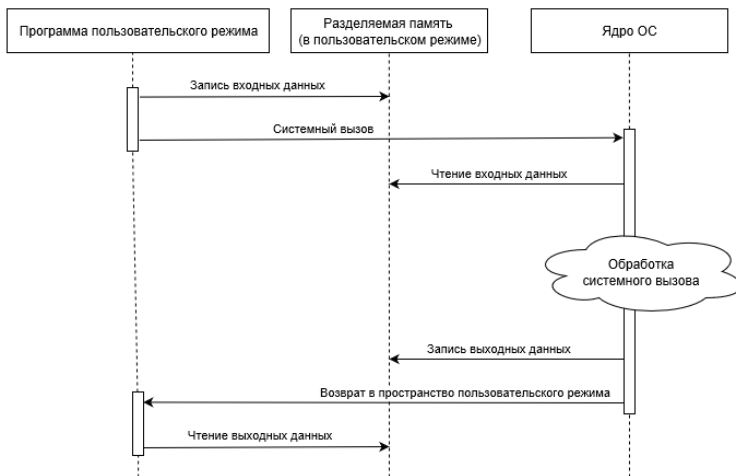


Рис. 1. Жизненный цикл системного вызова

Описание уязвимости. Уязвимость, которая позволяет атакующему повысить свой уровень привилегий, существует в ядре Windows и связана с тем, как ядро обрабатывает некоторые попытки создания потока, а именно чтение за пределами выделенного в памяти буфера. В случае успешной эксплуатации злоумышленник получит возможность выполнить произвольный код в режиме ядра и устанавливать программы, просматривать, изменять и удалять данные, а также создавать новые учетные записи с полными правами пользователя.

Множество критических с точки зрения производительности программ реализованы на языках программирования с низким уровнем абстракций (C и C++), которые склонны к появлению уязвимостей данного типа. Отсутствие защищенности этих языков программирования позволяет атакующим получить полный контроль над программой, изменять поток управления, иметь несанкционированный доступ к конфиденциальной информации. На данный момент предложены различные решения проблем, связанных с доступом к памяти. Механизмы защиты должны быть эффективны как с точки зрения безопасности, так и с точки зрения производительности.

Первую огласку ошибки памяти получили в 1972 г. И далее они являлись проблемой многих программных продуктов, средств, позволяющих применять эксплойты. Например, червь Морриса использовал множество уязвимостей, часть из которых была связана с ошибками работы с памятью.

Создание лабораторного стенда для наглядного рассмотрения уязвимости. Программа создана на языке программирования C# в среде разработки Visual Studio. В первую очередь необходимо создать методы, способные читать и редактировать память, находящуюся за пределами выделенной в .NET Framework области. Изначально данная возможность не доступна, так как используется общезыковая среда выполнения CLR независимо от реализации, отвечающая за компиляцию «управляемого кода» в машинный код и последующее выполнение. Управляемый код .NET Framework может вызывать неуправляемую функцию из DLL (функцию Windows API) при помощи специального механизма Platform Invoke, для того чтобы обратиться к какой-нибудь неуправляемой библиотеке DLL. В нашем случае это kernel32 – динамически подключаемая библиотека, являющаяся ядром всех версий ОС Microsoft Windows. Она предоставляет приложениям многие базовые API Win32 функции, такие как управление памятью, операции ввода-вывода, создание процессов, потоков и функции синхронизации. Импортируем все необходимые библиотеки, как показано на рис. 2.

```
[DllImport("kernel32", SetLastError = true, CharSet = System.Runtime.InteropServices.CharSet.Auto)] // Импорти функций из Библиотеки "kernel32"
static extern IntPtr CreateToolhelp32Snapshot([In]uint32 dwFlags, [In]uint32 th32ProcessID); // SetLastError - в случае ошибки исключение

[DllImport("kernel32", SetLastError = true, CharSet = System.Runtime.InteropServices.CharSet.Auto)] //CharSet - автоматическая кодировка
static extern bool Process32First([In]IntPtr hSnapshot, ref PROCESSENTRY32 lppe); //CreateToolhelp32Snapshot() - функция с параметрами "/"

[DllImport("kernel32", SetLastError = true, CharSet = System.Runtime.InteropServices.CharSet.Auto)] //получение списка процессов
static extern bool Process32Next([In]IntPtr hSnapshot, ref PROCESSENTRY32 lppe);

[DllImport("kernel32.dll", SetLastError = true)] // получение дескриптора процесса
public static extern IntPtr OpenProcess(ProcessAccessFlags processAccess, bool bInheritHandle, int processId);

[DllImport("kernel32", SetLastError = true)]
{return: MarshalAs(UnmanagedType.Bool)}
private static extern bool CloseHandle([In] IntPtr hObject);

[DllImport("kernel32.dll", SetLastError = true)] //чтение данных
public static extern bool ReadProcessMemory(IntPtr hProcess, IntPtr lpBaseAddress, byte[] lpBuffer, int32 nSize, out IntPtr lpNumberOfBytesRead);

[DllImport("kernel32.dll", SetLastError = true)]
public static extern bool WriteProcessMemory(IntPtr hProcess, IntPtr lpBaseAddress, byte[] lpBuffer, int32 nSize, out IntPtr lpNumberOfBytesWritten);

[DllImport("kernel32.dll", SetLastError = true)]
public static extern bool WriteProcessMemory(IntPtr hProcess, IntPtr lpBaseAddress, [MarshalAs(UnmanagedType.AsAny)] object lpBuffer, int dwSize, out IntPtr lpNumberOfBytesWritten);

[DllImport("kernel32", CharSet = CharSet.Ansi, ExactSpelling = true, SetLastError = true)]
static extern IntPtr GetProcAddress(IntPtr Module, string procName);
```

Рис. 2. Библиотеки для работы с API Win32

Опишем метод для получения процесса приложения, как показано на рис. 3.

```

public int GetProcessName()//метод возвращающий id процесса
{
    this.pId=0;
    IntPtr handleToSnapshot = IntPtr.Zero;
    try
    {
        PROCESSENTRY32 procEntry = new PROCESSENTRY32();
        procEntry.dwSize = (UInt32)Marshal.SizeOf(typeof(PROCESSENTRY32));//указываем размер для структуры
        handleToSnapshot = CreateToolhelp32Snapshot((uint)SnapshotFlags.Process, 0);// помещаем в handleToSnapshot снимок всех процессов
        if (Process32First(handleToSnapshot, ref procEntry))
        {
            do//перебираем все процессы
            {
                if (this.pName == procEntry.szExeFile) //если имя процесса совпало с именем снимка
                {
                    this.pId = (int)procEntry.th32ProcessID;//получаем процесс и прерываем цикл
                    break;
                }
            } while (Process32Next(handleToSnapshot, ref procEntry));
        }
    }
}

```

Рис. 3. Получение id процесса

Получаем список процессов, сверяем с именем нужного нам, при нахождении записываем id процесса. Далее описываем методы для работы с памятью, как показано на рис. 4 и 5.

```

public byte[] ReadMemory(IntPtr address, uint size)//получение данных памяти по адресу
{
    byte[] byffer = new byte[size];
    IntPtr bytesRead = IntPtr.Zero;
    IntPtr hProcess = OpenProcess(ProcessAccessFlags.All, false, this.pId);
    ReadProcessMemory(hProcess, address, byffer, size, out bytesRead);
    CloseHandle(hProcess);
    return byffer;
}

```

Рис. 4. Метод для чтения содержимого памяти

```

public void WriteMemory(IntPtr address, byte[] value)// запись значения по адресу
{
    IntPtr hProcess = OpenProcess(ProcessAccessFlags.All, false, this.pId);
    UIntPtr bytesWritten = UIntPtr.Zero;
    WriteProcessMemory(hProcess, address, value, (uint)value.Length, out bytesWritten);
    CloseHandle(hProcess);
}

```

Рис. 5. Метод для редактирования содержимого памяти

Протестируем работу приложения на примере подмены значения, внесенного в калькулятор. Для манипуляций нам необходимо знать адрес искомого значения. Был написан сканер сигнатур, пробегающий по регионам памяти процесса и записывающий адреса, но данный код нуждается в существенной доработке, поэтому воспользуемся для поиска сторонней программой Cheat Engine. Получаем имена всех процессов, запущенных на данной операционной системе, и заполняем поле ввода (рис. 6). При нажатии кнопки «Получить» значение, находящееся по заданному адресу 0x0022615C, было заменено на значение, записанное нами в переменную value, как показано на рис. 7.

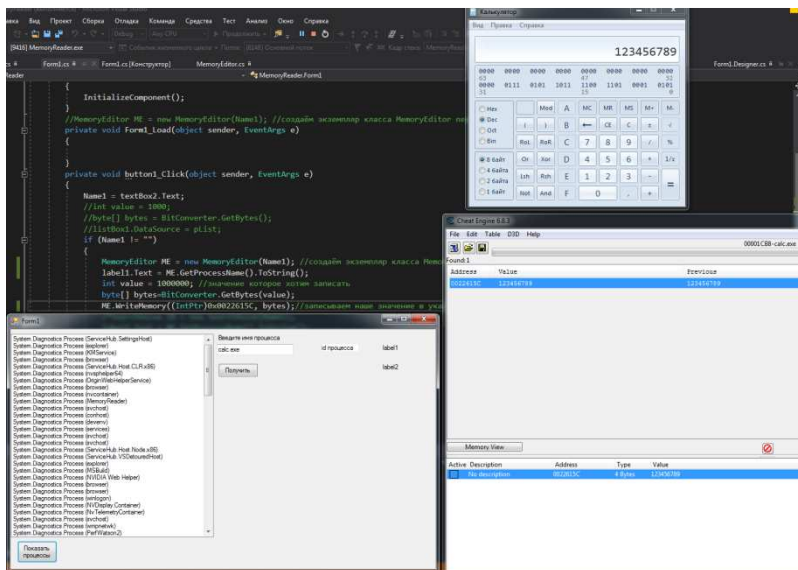


Рис. 6. Ввод данных

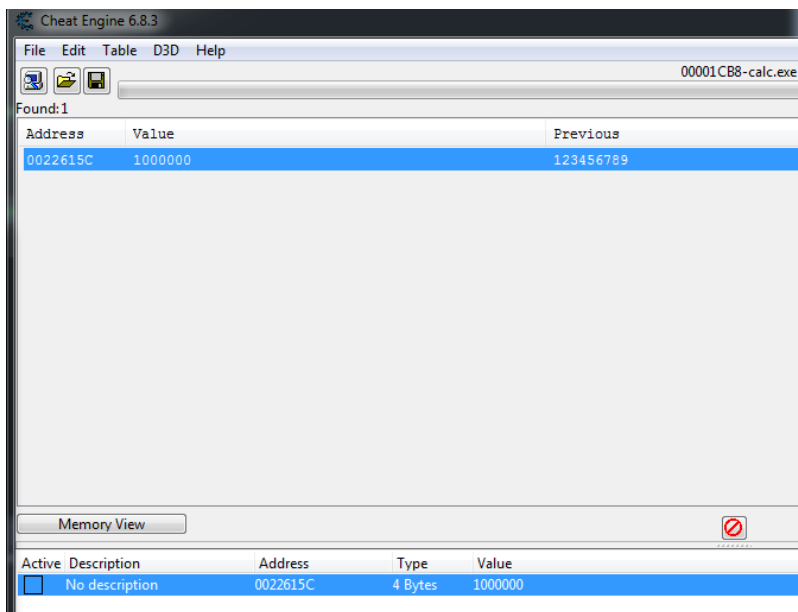


Рис. 7. Проверка работы программы

Использование данной уязвимости не требует большого опыта в программировании или глубоких познаний, вся информация была взята из открытых источников. В ходе работы был создан рабочий прототип программы, позволяющий считывать и перезаписывать данные приложений. Программа пригодна для демонстрации принципа работы уязвимости. В будущем ее функционал будет дорабатываться и расширяться, в частности это касается поиска адреса интересующего нас значения без использования сторонних программ и демонстрации реальной атаки. Также дальнейшая работа подразумевает поиск способов защиты приложений для предоставления возможности имитации на данном стенде атаки на приложение и отработки способов противодействия.

Библиографический список

1. Веб-сайт сигнатуры для функций Microsoft API. – URL: <http://www.pinvoke.net/default.aspx/kernel32/CreateFileMapping.html>
2. Рихтер Дж. P55 CLR via C#. Программирование на платформе Microsoft .NET Framework 4.5 на языке C#. – 4-е изд. – СПб.: Питер, 2013. – 896 с.
3. Форум вопросов и ответов для программистов. – URL: <https://ru.stackoverflow.com/questions/489942/Как-импортировать-kernel32-dll>

Сведения об авторах

Епанов Евгений Сергеевич – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КОБ-16-1с, г. Пермь, e-mail: evgenii.epanov@gmail.com

Каменских Антон Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: antoshkinoinfo@yandex.ru

Д.И. Парфенов, В.А. Торчин, Л.С. Забродина

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПОИСКА УЯЗВИМОСТЕЙ
В СЕТЯХ ПРОВАЙДЕРОВ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ
УСЛУГ НА ОСНОВЕ РЕВЕРСИВНОГО АНАЛИЗА
ЖУРНАЛОВ СЕТЕВЫХ СОБЫТИЙ**

Рассмотрен подход к поиску уязвимостей в сетях провайдеров телекоммуникационных услуг, построенный на основе анализа событий в журналах различных систем, в том числе отвечающих за сетевую безопасность.

Ключевые слова: сетевая безопасность, корреляция событий, siem-системы.

D.I. Parfenov, V.A. Torchin, L.S. Zabrodina

**DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM OF SEARCHING
VULNERABILITIES IN THE NETWORKS OF PROVIDERS
OF TELECOMMUNICATION SERVICES BASED ON REVERSE
ANALYSIS OF JOURNALS OF NETWORK EVENTS**

This article discusses approaches to finding vulnerabilities in networks of telecommunications service providers, built on the basis of an analysis of events in the logs of various systems, including those responsible for network security.

Keywords: network security, event correlation, siem systems.

В настоящее время существует множество угроз сетевой безопасности. Это особенно актуально для операторов связи и провайдеров телекоммуникационных услуг, являющихся ключевым звеном инфраструктуры передачи данных для любой компании [1]. Для обеспечения защиты собственной инфраструктуры и сервисов им приходится применять нетривиальные решения. Инфраструктура провайдеров телекоммуникационных услуг на сегодняшний день, как правило, строится на базе автономных систем [2]. Это позволяет изолировать потоки пользователей и сократить возможный ущерб в случае проведения атаки на конкретного пользователя. Операторы связи для защиты от внешних и внутренних угроз активно используют комплексные системы управления информацией и событиями, для построения которых актуально использование SIEM-технологии

(Security Information and Event Management). Как правило, они строятся по проактивному принципу – реакция на инциденты осуществляется до того, как ситуация станет критичной. Активной разработкой подобных систем занимается организация MASSIF (Management of Security information and events in Service InFrastructure – управление информацией и событиями безопасности в инфраструктурах услуг). В ее рамках разрабатываются универсальные методы многоуровневой корреляции событий безопасности, которые позволяют осуществлять максимально раннее выявление инцидентов. Подобный подход реализован в системах OSSIM и Prelude. Основной составляющей SIEM-систем является подсистема обнаружения и защиты от нежелательного и опасного трафика.

Согласно комплексному исследованию Gather по состоянию на апрель 2015 г., в число ведущих поставщиков решений для обеспечения безопасности крупного и среднего бизнеса вошли Check Point Software Technologies, Cisco, Palo Alto Networks и Fortinet. Комплексная концепция Cisco SecureX использует описание на основе бизнес-языка для упрощения создания политики безопасности. После формализации политики она переносится через унифицированный интерфейс взаимодействия на устройства Cisco. Все сенсоры IDS объединяются в общую локальную базу, которая синхронизируется с глобальной облачной системой знаний об угрозах и атаках. Cisco также использует программно-конфигурируемые сети на базе OpFlex для управления политиками безопасности (Open Policy Framework) и поддерживает OpenFlow в маршрутизаторах для применения этих политик или для управления с помощью сторонних средств. Check Point применяет облачные принципы накопления и анализа данных по безопасности, причем каждый администратор может моделировать любую известную атаку на свою систему при помощи Check Point Threat Emulation. CheckPoint не использует управление сторонними устройствами напрямую, но предоставляет API для пассивного взаимодействия, например с Cisco ASA через Cisco ACI посредством выделенного сервера взаимодействия APIC.

Решение, предлагаемое Fortinet, осуществляет защиту на конечных устройствах, там же осуществляется классификация трафика и определяется степень его опасности. В проекте не учитывается возможность управления промежуточными устройствами, но реализуется поддержка технологии программно-конфигурируемых сетей,

в частности протокола OpenFlow. Также имеются решения для защиты виртуальных сред, в том числе на базе ПО с открытым исходным кодом. Для управления внешними устройствами используется как технология программно-конфигурируемых сетей, так и API интерфейса интеграции, например Cisco ACI и HP ArcSight. Остальные производители очень широко представлены на рынке РФ и, в частности, в крупных компаниях и структурах – Huawei, HP и Juniper Networks. Huawei использует концепцию Agile для унификации взаимодействия со всеми устройствами с помощью программно-конфигурируемых сетей на базе OpenFlow. Все события безопасности коррелируются со сведениями из глобальных баз данных, реакция на инциденты реализуется на подключенном устройстве, расположенном максимально близко к источнику опасности. Кроме того, данная концепция позволяет обезопасить решения по работе с большими данными, интернет-вещами и терабитными каналами связи. Компания HP в своей концепции TippingPoint использует принципы нахождения зависимостей и закономерностей из многих источников в локальной и облачной базах данных.

Обнаружение вторжений – это важная часть защиты системы. На сегодняшний день существует множество коммерческих продуктов, позволяющих обеспечивать безопасность в сетевой среде [3]. Однако поиск и корреляция множества событий, непосредственно вызвавших вторжение в телекоммуникационную инфраструктуру, является достаточно сложной и многокритериальной задачей. Дело в том, что поиск уязвимостей ограничен рамками существующих методов, которые не всегда позволяют найти источник инцидента [4]. В связи с этим необходимы более совершенные методы.

Для повышения эффективности безопасности необходима корреляция данных между различными журналами для повышения точности систем обнаружения вторжений. Различные атаки могут быть зафиксированы в разных журналах событий, и для существующих систем безопасности при анализе одного журнала цель компрометации системы может быть не очевидна. Благодаря использованию средств интеллектуального анализа данных и корреляции между журналами можно повысить эффективность системы обнаружения вторжений при одновременном снижении ложных срабатываний.

В рамках настоящего исследования разработан подход к поиску уязвимостей в сетях провайдеров телекоммуникационных услуг, по-

строенный на основе анализа событий в журналах различных систем, в том числе отвечающих за сетевую безопасность.

Журналы сетевых событий являются одним из важнейших средств для анализа работы компьютерных сетей, в том числе и с точки зрения оценки защищенности сети. В сети провайдеров журнал сетевых событий представляет собой совокупность записей о произошедших обменах данных между узлами, а также об изменениях, возникших в рамках взаимодействий как отдельных узлов, так целых сегментов.

В работе рассматривается два подхода к анализу журналов сетевых событий – построение графа атаки за счет реверсивного анализа сетевых событий и промежуточного анализа аномальной активности. Для дальнейшего рассмотрения подходов необходимо ввести ряд моделей с целью формализации алгоритмов, лежащих в основе.

Журналы сетевых событий, как правило, представляют собой совокупность последовательностей, отражающих изменения, происходящие в инфраструктуре провайдера телекоммуникационных услуг с течением времени и под воздействием определенных внешних или внутренних факторов. При этом сам набор этих факторов можно разделить на две большие группы не только по источнику их возникновения, но и по влиянию, оказываемому ими на сеть провайдера. К первой группе факторов относят события, не приводящие к негативным последствиям для сетевой и физической инфраструктуры. К ним, как правило, относят типовые технологические операции, выполняемые в рамках повседневной деятельности провайдера по организации новых каналов связи и поддержанию работоспособности существующих связей в динамически изменяющейся сетевой среде, за исключением действий, вызывающих аварийные ситуации. Ко второй группе факторов относят события, которые прямо или косвенно ухудшают или наносят вред сетевой или физической инфраструктуре. К таким событиям, как правило, относят различные виды атак, а также аварийные ситуации на сети.

Как правило, каждая информационная или сетевая система формирует собственный лог событий, отражающий действия пользователей, или процессов, или компонентов, влияющих на ее работу. Тем не менее все события, происходящие в сети, независимо от вида отражаются в журнале с соответствующей меткой времени. Такой способ записи позволяет в дальнейшем расследовать инциденты сетевой

безопасности и определять затронутые узлы. На практике для корреляции событий, произошедших на различных узлах, провайдеру необходимо агрегировать полученные данные в едином формате, содержащем базовую информацию о произошедшем событии. Для операторов связи задача сбора сведений о сетевых взаимодействиях является нетривиальной и требует отдельного рассмотрения для каждой конкретной системы. Исходя из этого в рамках настоящего исследования представим запись о событии в журнале в упрощенном виде, а именно в форме вектора z следующего вида:

$$z = \{\text{date_time}, \text{src_ip}, \text{dst_ip}, \text{protocol}, \text{src_port}, \text{dst_port}, \text{size}\},$$

где date_time – момент времени, в который произошло рассматриваемое взаимодействие; src_ip – ip-адрес источника сообщения; dst_ip – ip-адрес получателя сообщения; protocol – протокол, по которому осуществлялся обмен сообщениями; src_port – номер сетевого порта источника сообщения; dst_port – номер сетевого порта получателя сообщения; size – размер пакета.

Тогда множеством $Z = \{z_1, \dots, z_n\}$ обозначим журнал сетевых событий за определенное время, где n – последовательный набор временных меток.

Одной из задач в рамках обеспечения безопасности сетевой инфраструктуры является поиск аномалий в журналах сетевых событий.

Как правило, для выявления аномалий в сетевой активности провайдеры используют статистические данные, накопленные за различные периоды времени. На основе накопленных данных для каждого элемента, входящего в состав сетевой инфраструктуры провайдера, строится модель профиля типовой активности. Для этого из журнала сетевых событий необходимо выбрать множество записей, соответствующих только выбранному элементу сети. В рамках построенной модели журнала сетевых событий такую выборку можно представить в виде множества Z_k :

$$Z_k = \{z_1, \dots, z_m\}, \forall z_j: \text{src_ip}_j = a_k \vee \text{dst_ip}_j = a_k.$$

Обобщая статистические данные для каждого узла, получаем множество, которое обозначим как C_k .

Исходя из определения множества C_k аномальную активность можно обозначить в виде множества, состоящего из записей, не подходящих к типовым профилям пользователей. Формально записываем в следующем виде:

$$z_r: \text{src_ip}_r = a_k \vee \text{dst_ip}_r = a_k, z_r \in Z \wedge z_r \notin C_k.$$

На основе построенной модели в рамках настоящего исследования разработан алгоритм построения возможного графа атаки с помощью реверсивного анализа журналов сетевых событий. Идея подхода состоит в применении к журналам событий алгоритма рекурсивного поиска с целью получения цепочек событий.

Дано:

$Z = \{z_1, \dots, z_n\}$ – журнал событий за некоторый период времени,

где

$z_i = \{\text{date_time}_i, \text{src_ip}_i, \text{dst_ip}_i, \text{protocol}_i, \text{src_port}_i, \text{dst_port}_i, \text{size}_i\}$

$\exists r: z_r$ – заведомо известный инцидент безопасности;

$C_k = \{z_1, \dots, z_m\}, \forall z_j: \text{src_ip}_j = a_k \vee \text{dst_ip}_j = a_k \forall k$ – профили типовой активности узлов сети.

Шаг 1: найти в Z события $z_i: \text{date_time}_i \leq \text{date_time}_r, \text{src_ip}_i = \text{src_ip}_r \vee \text{dst_ip}_i = \text{dst_ip}_r$, тем самым получив множество Z_i .

Шаг 2: $\forall z_p \in Z_{i-1}$ найти в Z события $z_i: \text{date_time}_i \leq \text{date_time}_p, \text{src_ip}_i = \text{src_ip}_p \vee \text{dst_ip}_i = \text{dst_ip}_p$.

Повторять пока $Z_{i-1} \neq \emptyset$.

Шаг 3: все цепочки событий проранжировать по количеству аномальных активностей.

Алгоритм, изложенный выше, позволяет построить все вероятные маршруты атаки с целью отслеживания первоисточника.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 18-07-01446, гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (МК-860.2019.9), а также Министерства образования Оренбургской обл. в рамках НИР «Интеллектуальная система идентификации источников и прогнозирования распространения инцидентов кибербезопасности для адаптивного управления механизмами защиты в среде провайдеров телекоммуникационных услуг».

Библиографический список

1. Анализ методов корреляции событий безопасности в SIEM-системах / А.В. Федорченко, Д.С. Левшун, А.А. Чечулин, И.В. Котенко // Тр. СПИИРАН. – 2016. – Ч. 2, № 6(49). – С. 208–225.

2. 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.

3. Браницкий А.А., Котенко И.В. Анализ и классификация методов обнаружения сетевых атак // Тр. СПИИРАН. – 2016. – № 2(45). – С. 207–244.

4. Комашинский В.И. Методы профилирования и выявления аномалий для обнаружения вредоносной активности // Информационные технологии в управлении (ИТУ-2018): материалы конференции. – 2018. – С. 446–450.

Сведения об авторах

Парфенов Денис Игоревич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладная математика» Оренбургского государственного университета, г. Оренбург, email: parfenovdi@mail.ru

Торчин Вадим Александрович – магистрант Оренбургского государственного университета, гр. 18ПМИ(м)ООУ, г. Оренбург, email: vadim.torchin@gmail.com

Забродина Любовь Сергеевна – магистрант Оренбургского государственного университета, гр. 18ПМИ(м)ООУ, г. Оренбург, email: zabrodina97@inbox.ru

А.В. Садилов

О ГЕНЕРАТОРАХ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ И ПЕРСПЕКТИВАХ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СОВРЕМЕННОМ МИРЕ

Приводится описание генераторов псевдослучайных чисел, их разновидностей, предъявляемых к ним требований и возможностей их использования в настоящем и будущем. Целью статьи является обобщение данных для проведения дальнейших исследований.

Ключевые слова: ГСЧ, ГПСЧ, информационная безопасность, криптография, уязвимости ИБ.

A.V. Sadilov

ABOUT THE PSEUDORANDOM NUMBER GENERATORS AND PERSPECTIVES OF THEIR USAGE IN THE MODERN WORLD

This article describes the pseudo-random number generators, their varieties, the requirements placed on them and the possibilities of using them in the present and the future. The purpose of the article is to compile data for further research.

Keywords: RNG, PRNG, information security, cryptography, vulnerabilities of information security.

Немногие знают, что случайные числа встречаются нам на каждом шагу. И их число в нашей жизни становится тем больше, чем большим числом информационных систем мы себя окружаем. Если речь идет о средствах информационной безопасности (ИБ), то их количество возрастает многократно. Это объясняется тем, что множество программных процессов используют случайные числа в своей работе, а приложения ИБ практически полностью основаны на них, в частности средства криптозащиты.

При этом возникает проблема: действительно случайные числа компьютер генерировать не умеет. Он может лишь симитировать некоторую последовательность случайных чисел, подчиняясь некоторому заранее заданному алгоритму. Для этих целей существуют генераторы псевдослучайных чисел.

Генератором псевдослучайных чисел (ГПЧ) называется алгоритм, способный на выходе представлять определенную последовательность чисел, отдельные элементы которой практически не зависят друг от друга и при этом подчиняются заданному заранее распределению. ГПЧ следует отличать от собственно генераторов случайных чисел (ГСЧ), которые используются в тех случаях, когда нужна полностью случайная последовательность чисел, в результате чего можно пренебречь такими их недостатками, как сложность генерации, дороговизна и низкая скорость относительно скорости современных процессоров. Источниками истинно случайных чисел считаются различные физические шумы (дробовой шум в резисторе, космическое излучение, «фон» звуковой карты компьютера), счетчики тактов процессоров, колебания физических свойств объектов и т.д. Однако вследствие вышеописанных недостатков подобные решения зачастую не только труднодоступны, но и избыточны.

Гораздо более перспективно выглядит генерация именно псевдослучайных чисел, которая происходит в большинстве случаев полностью программно и с большей скоростью (однако для улучшения параметров сгенерированных последовательностей иногда применяется комбинация с ГСЧ, когда сгенерированные ГСЧ случайные последовательности используются для порождения псевдослучайных чисел). Кроме того, псевдослучайность сгенерированных последовательностей также подразумевает возможность повторения этой последовательности на выходе по прошествии определенного периода времени, что может быть полезно, например, для проверки.

Однако вследствие возможности перехвата злоумышленником полного цикла значений это качество, как и ряд других (явная зависимость последовательных значений друг от друга, обратимость, меньшая случайность одних значений по сравнению с другими), является фактором, сводящим на нет возможность использования обладающих их низкими значениями алгоритмов в серьезных проектах.

Соответственно, к хорошим ГПСЧ предъявляются следующие требования:

- располагание большой длиной периода, по прошествии которой последовательность начнет повторяться. Она не может быть бесконечной, но должна быть достаточной для решения поставленной задачи;
- обладание высокой эффективностью использования аппаратных средств, выражающейся в скорости работы алгоритма;

- возможность воспроизводимости сгенерированной последовательности по истечении определенного периода любое требуемое число раз;

- возможность воспроизведения алгоритма на различном оборудовании, пусть и с различной эффективностью;

- следующие сгенерированные биты не должны зависеть от предыдущих, чтобы последовательность нельзя было предугадать по нескольким полученным потенциальным злоумышленником значениям.

Более того, существуют так называемые криптографические генераторы псевдослучайных чисел, требования к которым еще выше и варьируются в зависимости от решаемой задачи. В общем случае к ним предъявляются две группы требований: они должны проходить статистические тесты на случайность, а также иметь способность быть непредсказуемыми, даже если часть их состояния известна криптоаналитику. Несмотря на подобные требования, доступность подобных решений все же выше, чем у аппаратных реализаций ГСЧ.

Сегодня в обеспечении информационной безопасности ГСЧ и ГПЧ решают обширный спектр задач. В криптографии они применяются, например, для генерации симметричных и асимметричных ключей для шифрования (ГСЧ в том случае, когда необходимы именно уникальные одноразовые ключи), генерации соли для хранения паролей. В моделировании процессов информационной безопасности ГПЧ используются для создания реалистичной имитационной модели. В относительно повседневных задачах – для генерации паролей, идентификаторов сессий.

В последние десятилетия внимание к обеспечению информационной безопасности, равно как и потребность в качественной генерации случайных чисел, увеличивалось экспоненциально. Более того, интерес к качественным ГПСЧ начинают проявлять даже обыкновенные пользователи. На фоне этого кажется разумным задуматься о способах повышения доступности качественных ГПСЧ, выраженных в виде готовых решений, удобных как для использования профессионалами в области ИБ различного уровня, так и для обыкновенных людей.

Библиографический список

1. Слеповичев И.И. Генераторы псевдослучайных чисел / СГУ. – Саратов, 2017. – 118 с.

2. Червонная О.В. Рекомендации по применению случайных чисел криптографического качества при разработке программного обеспечения / Нац. горный ун-т. – Донецк, 2013.
3. O'Neill ME PCG: A family of simple fast space-efficient statistically good algorithms for random number generation // ACM Transactions on Mathematical Software. – 2014.
4. Random numbers for parallel computers: Requirements and methods, with emphasis on GPUs / L'Ecuyer, Pierre Munger, David Oreshkin, Boris Simard, Richard // Mathematics and Computers in Simulation. – 2017. – Vol. 135. – P. 3–17.
5. Tadej Ciglaric, Rok Cesnovar, Erik Strumbelj. An OpenCL library for parallel random number generators // The J. of Supercomputing. – 2018. – No. 3.

Сведения об авторе

Садиков Андрей Вячеславович – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КЗИ-18-1м, г. Пермь, e-mail: sadik.andrei@yandex.ru

Д.П. Цысь, Н.Р. Осипов

АНАЛИЗ ЗАПРОСОВ ИЗ ОТКРЫТОЙ СЕТИ К ЗАЩИЩАЕМОМУ РЕСУРСУ

В настоящее время жизнь человека связана с новыми технологиями. Интернет используется в большинстве сфер повседневной жизни, однако вопросам обнаружения и защиты от атак из открытой сети не уделяется должного внимания. Цель данной работы – анализ запросов из открытой сети к защищаемому ресурсу.

Ключевые слова: система обнаружения вторжений, COB, компьютерная атака, сканирование, Suricata.

D.P. Tsys, N.R. Osipov

ANALYZE REQUESTS FROM AN OPEN NETWORK TO A PROTECTED RESOURCE

At the now day, a person's life is connected with new technologies. The Internet is used in most areas of daily life, however due attention is not being paid to detection and protection against attacks from an open network. The purpose of this work is to analyze requests from an open network to a protected resource.

Keywords: intrusion detection system, IDS, cyber attack, scanning, Suricata.

Что такое система обнаружения вторжений? Периодически все компьютерные сети и программные системы подвергаются атакам. Работы антивирусов зачастую недостаточны. Они не могут гарантировать полноценную защиту системы. В таком случае применяются межсетевые экраны и системы обнаружения вторжений.

Система обнаружения вторжений – это совокупность программных и/или аппаратных средств, служащих для выявления фактов несанкционированного доступа к компьютеру или компьютерной сети.

К главным частям систем обнаружения вторжений (COB) можно отнести:

- считывающую подсистему, накапливающую информацию с сети;
- анализирующую часть системы, определяющую нападения или вредоносные действия;
- базу данных, в которой хранится вся информация о собранных данных, атаках, анализе и т.д.;

— систему управления, с помощью которой пользователь может задать критерии работы всей системы, просматривать сеть, разграничивать доступ для просмотра нападений, отчетов анализа.

Классификация систем обнаружения вторжений. Существует несколько видов систем обнаружения вторжения. Рассмотрим по способу мониторинга и по методам выявления атак. По способу мониторинга выделяют системы сетевые COB (NIDS) и локальные COB (HIDS).

Под системами вида NIDS понимаются системы обнаружения вторжений уровня сети, которые следят за вторжениями в информационную сеть в целом. Такие системы анализируют каждый поступающий в систему пакет, ищут в нем соответствие сигнатурам, заложенным в базе решающих правил. В случае обнаружения совпадения в журнал записывается информация об атаке. При использовании таких систем следует учитывать размеры защищаемой сети, так как при большом количестве входящего трафика могут возникнуть задержки.

Системы вида HIDS отслеживают вторжения только на один конкретный локальный хост. Данные системы наблюдают за работой системы, сканируют файлы и сопоставляют их с более ранней версией. При возникновении изменений система выдает сообщение о проблеме. Системы обнаружения вторжений различаются также по методам выявления атак:

1. Системы, анализирующие сигнатуру. При использовании такого метода выявляются только те атаки, которые указаны в базе решающих правил.
2. Системы, использующие метод аномалий. Такие системы отслеживают отклонения состояния сети и системы от нормального функционирования.
3. Системы, использующие метод политик.

Статистика запросов из открытой сети на защищаемый ресурс. В рамках тестирования системы обнаружения вторжений был развернут экспериментальный стенд.

На компьютер, подключенный к сети «Интернет», была установлена система обнаружения вторжений Suricata. В качестве модуля сбора данных выступил программный продукт Elasticsearch. Системой визуализации была выбрана Kibana. Экспериментальный стенд имел «белый» IP-адрес и был доступен из открытой сети. В качестве базы решающих правил были использованы актуальные на момент

установки дистрибутива. Экспериментальный стенд был опубликован в сети «Интернет». Целью эксперимента являлось изучение распределения запросов из открытой сети к защищаемому ресурсу.

Изменение распределения запросов к защищаемому ресурсу из открытой сети представлено на рис. 1–4.



Рис. 1. Распределение запросов к защищаемому ресурсу спустя 2 дня после опубликования

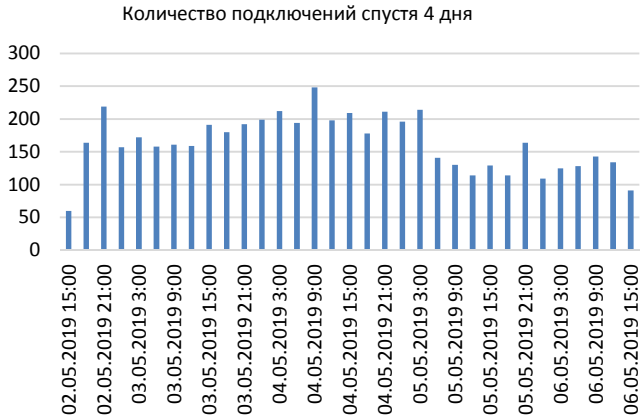


Рис. 2. Распределение запросов к защищаемому ресурсу спустя 4 дня после опубликования

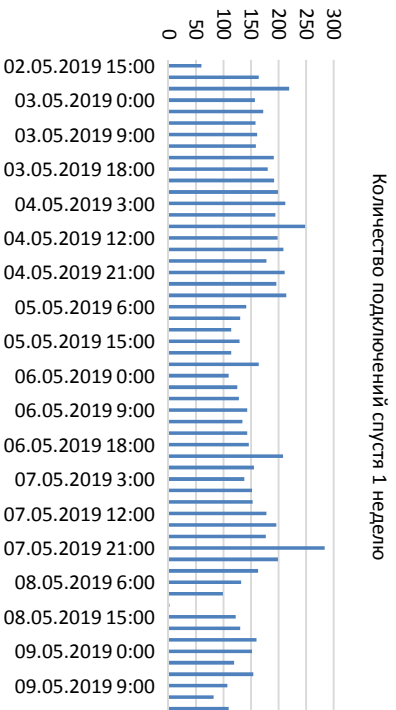


Рис. 3. Распределение запросов к защищаемому ресурсу спустя 1 неделю после опубликования

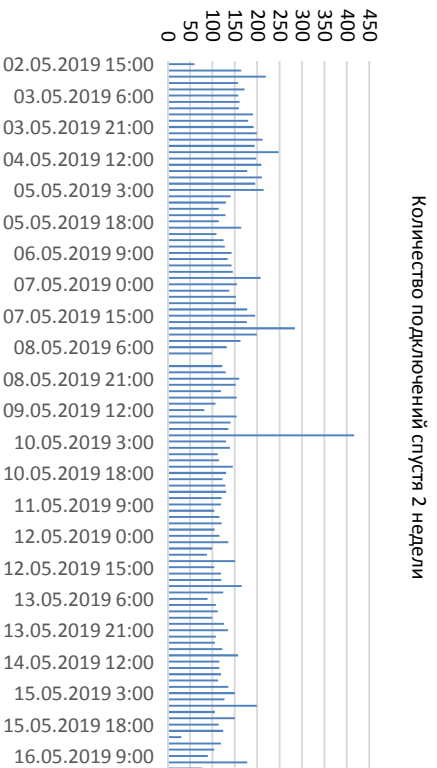


Рис. 4. Распределение запросов к защищаемому ресурсу спустя 2 недели после опубликования

На основе полученных данных можно сделать вывод о распределении запросов, а также выявить несколько потенциально возможных атак. В течение первых 2–4 дней можно наблюдать нормальное распределение. Отсутствие резких пиков позволяет отнести данный трафик к деятельности поисковых и индексующих программ.

На диаграмме количества подключений спустя 1 неделю явно распознается скачок трафика в период с 07.05.2019 18:00 по 08.05.2019 00:00. Показания количества подключений выросли с 177 до 284, а затем упали до 199. Подобный скачок потенциально может быть отнесен к атаке. На данном временном промежутке деятельность поисковых и индексирующих программ уже прекращается. При подробном анализе было выявлено, что запросы поступали с одного и того же IP-адреса, тем самым подтверждается факт атаки.

На диаграмме количества подключений спустя 2 недели также явно различим скачок в период с 09.05.2019 21:00 по 10.05.2019 03:00. Показания количества подключений выросли с 136 до 416, а затем упали до 131. Подобный значительный скачок свидетельствует об атаке.

Таким образом, можно сделать вывод, что число запросов из открытой сети в первые дни после публикации показывает рост в связи с работой поисковых программ. Спустя неделю деятельность поисковых машин значительно падает и резкие скачки свидетельствуют о потенциальных атаках.

В связи со значительным ростом количества устройств, подключаемых к открытым сетям, необходимо все более ответственно подходить к их безопасности, а первоначальное конфигурирование производить заранее, так как первая атака может начаться через считанные дни после публикации устройства в сети «Интернет».

Сведения об авторах

Цысь Дарья Павловна – студентка Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КОБ-14-1с, г. Пермь, e-mail: czys@yandex.ru

Осипов Никита Романович – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КОБ-14-1с, г. Пермь, e-mail: nickit.osipow2013@yandex.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Секция III. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА	3
Харченко П.А., Горячев С.В. Разработка и обоснование эффективности мачты безопасного ветрогенератора	4
Сабитов Р.М., Семенова Н.Г. Система освещения парковой зоны	10
Нелюбов В.М., Матвейкин С.Н. Использование газотурбинной установки для повышения надежности системы электроснабжения технологических установок газоперерабатывающего завода	16
Лобанов В.А., Валиуллин К.Р. Имитационное моделирование участка энергосистемы в среде моделирования MatLab Simulink	22
Чабан А.В., Быковский В.В. Развитие и оценка эффективности способов защиты от феррорезонанса в электрических сетях 6–330 кВ.....	29
Шлейников В.Б., Викторов В.В., Япаров Д.А. К вопросу использования системы накопителей электроэнергии для электроснабжения индивидуальных потребителей	37
Жужгов Н.В., Вилисов Н.Н., Ключников А.Т. Влияние частоты питающей сети на угол нагрузки синхронного двигателя	40
Лебедев А.В. Разработка модульного расширения для микрокомпьютера Raspberry Pi3	46
Митрофанов С.В., Рыжков А.С. Разработка автоматизированной энергетической системы трехфазного ветрогенератора	52
Казаков А.В., Коломейцев А.Н. Моделирование обдува радиаторов	57
Токарев Р.О., Шапошников В.В., Любимов Э.В. Эскизный проект автономной системы электроснабжения для индивидуальных потребителей южной части Пермского края (район Чернушки)	62
Казаков А.В., Никитин Д.Р. Разработка методики и алгоритмов расчета маршрутов волочения	69
Казаков А.В., Шабловский А.С. Исследование течения расплава полимера в канале экструдера в различных постановах	75

Садчиков А.В., Юсупов Р.Р. Комплексная оценка эффективности использования биогазовых станций	81
Влацкая Л.А., Казаков Д.С. Применение метода неопределенных множителей Лагранжа в качестве решения задачи по оптимизации размещения компенсирующих устройств	85
Семенова Н.Г., Чугунов А.С. Прогнозирование коэффициента роста электрических нагрузок промышленного предприятия с помощью решения оптимизационных задач	89
Суховеев А.В., Митрофанов С.В. Автоматизированная система управления движением солнечной панели	95
Иванова И.А., Валиуллин К.Р., Митрофанов С.В. Выбор аппроксимирующей функции кривой намагничивания и разработка математической модели однофазного трансформатора тока	99
Морозов А.С. Разработка алгоритма кластерного анализа электропотребления установки электроцентробежного насоса	105
Горбачева Е.О., Митрофанов С.В. Применение нечеткой логики для расчета энергоемкости промышленного предприятия	111
Сухоруков А.Ю., Щербинин А.Г. Численное исследование режима работы силовых кабелей при коротком замыкании	115
Билоус О.А., Кухарчук А.В. К вопросу о применении неселективных междофазных токовых отсеков в сетях 6–10 кВ нефтедобывающих районов	119
Корелин А.А., Дятлов И.Я., Труфанова Н.М. Математическое моделирование процесса сшивки полиэтилена в азотной среде	124
Никитин М.С., Тюрин С.Ф. Разработка и исследование топологии отказоустойчивого инвертора	131
Сермягина Е.К., Крынов В.М. Определение экономической плотности тока для кабельных и воздушных линий в современных условиях	141
Горбунов В.И., Ершов С.В. Исследование процесса сшивки полиэтилена методом ДСК	147
Щербинин Д.П., Дятлов И.Я., Труфанова Н.М. Исследование стационарного режима работы греющего кабеля, продолженного внутри водопровода	152

Кабинова А.И., Щербинин А.Г. Исследование влияния коэффициента линейного термического расширения арамидных нитей на эксплуатационные характеристики самонесущего кабеля	158
Судаков А.И., Каменских И.А., Фалалеев Д.В. Снижение трудоемкости исследования и идентификации переходной составляющей в зашумленных переходных процессах синхронных машин	165
Щербинин А.Г., Шушкова Е.А. Численное исследование электрических полей силовых кабелей с секторными токопроводящими жилами	173
Попов И.А., Субботин Е.В. Компонентный анализ резиновой изоляции нефтепогружных кабелей	178
Елтышев Е.А., Трефилов В.А. Применение поперечной компенсации при питании асинхронного двигателя по протяженной линии	183
Белоглазова Т.Д., Субботин Е.В. Применение методов термического анализа при входном контроле кабельного ПВХ-пластиката	189
Гусин А.Н. Разработка приложения для сбора данных в сетях 0,4 кВ по протоколу PLC-I	193
Гольцов Е.С., Дятлов И.Я., Труфанова Н.М. Исследование процесса теплообмена при силановой сшивке	199
Сицилицин Д.А., Ромодин А.В. Методика экспресс-анализа электропотребления нефтескважин ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ»	204
Секция IV. ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ	209
Говорливых С.В., Тюрин С.А. Радиоинтерфейс 5G NR: технологии и принцип работы	210
Костарев В.В., Тюрин С.А. Обзор и сравнительный анализ сетевых технологий LoRaWAN и NB-IoT	216
Дубовцева Д.А., Фрейман В.И. Исследование методов и алгоритмов турбокодирования в инфокоммуникационных системах	221
Даденкова А.П. Исследование алгоритма снижения нагрузки и повышения результативности поиска данных в DHT-сети	228

Якунина Д.В., Кулагина М.М. Исследование помехоустойчивости цифровых трактов системы дистанционного управления электростанцией	236
Рыбникова С.Н., Тюрин С.А. Narrow-band IoT: структура и принцип работы	239
Дубовцева Д.А., Тюрин С.А. Технологии определения местоположения мобильных объектов в беспроводных сетях	246
Рыбникова С.Н., Кавалеров М.В. Исследование алгоритмов семейства Q-routing на разных видах топологий	252
Секция V. ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ	259
Кротова Е.Л., Чекменев А.В., Болгов А.О. Метод выделения стеганографических водяных знаков по ключу с использованием вейвлетов Хаара	260
Евстифеева Е.А., Каменских А.Н. Разработка модели построения связей между пользователями социальной сети «ВКонтакте»	267
Кротова Е.Л., Томилова Е.Д. Прогнозирование рисков информационной безопасности для криптовалютной биржи на основе алгоритмов машинного обучения	272
Шабуров А.С., Шлыков А.И., Двойнишников Н.Э. Анализ основных методов защиты веб-страниц и приложений от вредоносной активности	279
Князев А.И., Кокоулин А.Н. Разработка и исследование иерархической системы распознавания лиц	286
Субботина П.Д., Безукладников И.И. Методы неявной аутентификации и их применение при обеспечении комплексной информационной безопасности	291
Епанов Е.С., Каменских А.Н. Обзор уязвимостей в ОЗУ под управлением операционных систем на архитектуре Windows NT	295
Парфенов Д.И., Торчин В.А., Забродина Л.С. Разработка алгоритма поиска уязвимостей в сетях провайдеров телекоммуникационных услуг на основе реверсивного анализа журналов сетевых событий	301
Садиков А.В. О генераторах псевдослучайных чисел и перспективах их использования в современном мире	308
Цысь Д.П., Осипов Н.Р. Анализ запросов из открытой сети к защищаемому ресурсу	312

Научное издание

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ
УПРАВЛЕНИЯ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ**

Материалы всероссийской научно-технической
конференции

(г. Пермь, 30–31 мая 2019 г.)

В двух томах
Том 2

Корректор *И.Н. Жеганина*

Подписано в печать 12.12.2019.
Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 20,06.
Тираж 100 экз. Заказ 217/2019.

Издательство
Пермского национального исследовательского
политехнического университета.
Адрес: 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, к. 113.
Тел. (342) 219-80-33.