

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, 17 мая 2018 г.)

В двух томах
Том 2

Издательство
Пермского национального исследовательского
политехнического университета
2018

Конференция инициирована Ученым советом электротехнического факультета Пермского национального исследовательского политехнического университета и ориентирована 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

Ф.Н. Баянов, Н.В. Шулаков

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЛИНЕЙНЫХ ВЕНТИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В НЕФТЕДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Представлена концепция применения цилиндрического линейного вентильного электродвигателя (ЦЛВД) в сочетании с плунжерным насосом. Рассмотрены эффективность и преимущества данной концепции.

Ключевые слова: плунжерный насос, периодический режим работы, цилиндрический линейный вентильный двигатель.

F.N. Bayanov, N.V. Shulakov

PERSPECTIVES OF APPLICATION OF CYLINDRICAL LINEAR AC ELECTRONIC MOTOR IN OIL-EXCHANGING INDUSTRY

The concept of the use of a cylindrical linear AC electronic motor (CLEM) in combination with a plunger pump is presented. The efficiency and advantages of this concept are considered.

Keywords: plunger pump, intermittent operation, cylindrical linear AC electronic motor.

С момента начала использования нефти в производственных масштабах необходимость ее добычи неуклонно возрастает. Современная промышленность использует нефть для производства различного топлива, строительных материалов. В настоящее время для добычи нефти широко используется насосный способ, который реализуется посредством мощных глубинных насосов: штанговых, электроцентробежных погружных.

Наиболее распространена схема откачки нефти штанговыми глубинными насосами. Это относительно простой и недорогой метод. Доступная для этого способа глубина – до 2000 м. Производительность одного насоса – до 500 м³ в сутки. В связи с невысокой надёжностью и производительностью штанговых плунжерных насосов в наше время все больше применяются насосные установки погружного типа – электроцентробежные насосы (ЭЦН). Но и они имеют свои недостатки, их эффективность сильно снижается при добыче высоковязкой нефти и нефти с высоким содержанием свободного газа.

В данной статье предлагается использовать цилиндрический линейный вентильный электродвигатель (ЦЛВД) в сочетании с плунжерным насосом. ЦЛВД – это двигатель, способный совершать линейные возвратно-поступательные движения, минуя механические кривошипно-шатунные механизмы. Благодаря этому его можно использовать в добыче нефти, причем его использование позволяет добывать нефть бесштанговым способом. Объединение ЦЛВД с плунжерным насосом позволит добывать нефть из малодебитных скважин глубиной более 2 км, с большой кривизной, а также в горизонтальных скважинах. Это решение способствует более эффективной добыче за счет снижения затрат на подготовку фундамента под станок-качалку и абсолютного отсутствия потерь на трение штанг о колонну.

В нашей стране наибольшее распространение по количеству добывающих скважин получили штанговые насосы, а по объему добычи – погружные центробежные. Это связано с тем, что штанговые насосы предназначены для эксплуатации низко- и среднедебитных скважин, а центробежные – для эксплуатации средне- и высокодебитных скважин (рис. 1).

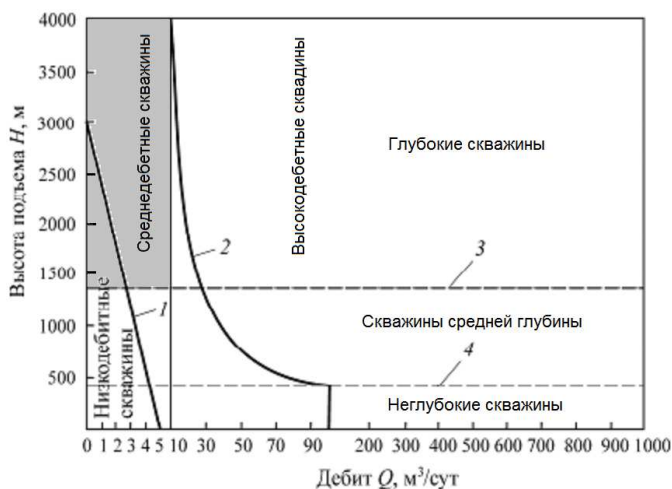


Рис. 1. Различные категории скважин по дебиту и высоте подъема

При существующих системах центробежных насосов нельзя уменьшить производительность глубинного насоса до значения, необходимого для эксплуатации малодебитной скважины в непрерывном

режиме, поэтому в настоящее время малодебитные скважины вынуждены работать в циклическом режиме, когда откачка жидкости из скважины производится периодически. Основное время насос отключен, и скважина постепенно заполняется пластовой жидкостью. Это обычно происходит в течение нескольких десятков часов. После заполнения скважины насос включается на несколько часов и откачивает накопившуюся в скважине жидкость.

Проектируемый привод ЦЛВД совмещен с плунжерным нефтедобывающим агрегатом, поэтому именно со станком-качалкой и необходимо производить его сравнение. Несмотря на совершенствование станков-качалок, они в недостаточной мере отвечают современным требованиям надежности эксплуатации скважины. Это связано с передачей к насосу усилия с помощью промежуточных механических звеньев – колонн штанг, кривошипа, редукторов.

Данный недостаток отсутствует у насосного агрегата, состоящего из ЦЛВД, совмещенного с плунжерным насосом. ЦЛВД питается с помощью армированного кабеля от преобразователя частоты, расположенного на поверхности земли рядом со скважиной. ЦЛВД управляется от ПЧ, который обеспечивает необходимую частоту качания и длину хода плунжера.

Благодаря исключению промежуточных звеньев между электроприводом и плунжерным насосом у данной конструкции возникает ряд существенных преимуществ:

- снижается металлоемкость конструкции,
- снижаются затраты на строительные и монтажные работы вследствие исключения вспомогательных конструкций;
- снижаются затраты на ремонты вследствие поломок и обрывов штанг;
- снижается эмульгирование нефти в насосно-компрессорных трубах;
- снижаются ограничения по глубине спуска плунжерного насоса (более 3 км).

Разрабатываемый привод погружного плунжерного насоса специальной конструкции является альтернативным вариантом, позволяющим устранить многие недостатки существующих станков-качалок. Таким образом, одним из новых путей совершенствования нефтедобывающего оборудования является возможность создания бесштанговой установки с погружными линейными двигателями воз-

вратно-поступательного движения. Выбор такой конструкции связан с тем, что единственным эффективным вариантом для низкодебитных и среднедебитных скважин является погружной плунжерный насос станка-качалки.

Соответственно, в качестве альтернативы более конкурентоспособным представляется использование насосного агрегата, основанного на зарекомендовавшем себя надежностью и характеристиками плунжерном насосе, в связке с погружным цилиндрическим линейным вентильным электродвигателем возвратно-поступательного движения. Использование плунжерного насоса, сочлененного с цилиндрическим линейным вентильным двигателем, позволяет снизить трение из-за отсутствия колонны штанг, использовать насосную установку в криволинейных скважинах, повысить общий КПД установки в целом по сравнению со станком-качалкой. Передача энергии к забою скважины в виде электрической энергии по кабелю намного эффективнее, чем механическая передача штангой (рис. 2).

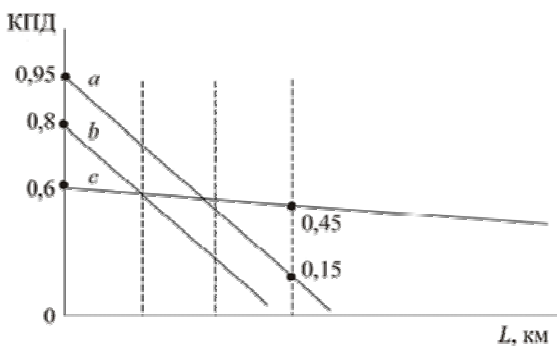


Рис. 2. Сравнение КПД насосных агрегатов: *a* – станок-качалка без нагревателя; *b* – станок-качалка с нагревателем; *c* – ЦЛВД

По наклону характеристик видно, что при передаче энергии механической штангой в забой скважины потери значительно больше, чем при передаче электрической энергии по кабелю. Таким образом, можно сделать вывод, что при больших глубинах добычи штанги становятся малопригодны и ЦЛВД получает преимущество.

Основной проблемой ЦЛВД в составе ПБЭНА является пониженный КПД (55–65 %), что связано с низкой частотой ПЧ (5–7 Гц) для нормального обеспечения работы привода из-за необходимости низкой скорости хода штанги плунжерного насоса. Понижение частоты

питающей сети от ПЧ для уменьшения количества ходов при добыче нефти, для регулирования дебита, нерационально, так как резко начинает снижаться энергетический КПД ЦЛВД. Особенностью проектируемого насосного агрегата ПБЭНА на основе ЦЛВД является возможность работы в периодическом режиме, такой режим наиболее рационален с точки зрения поддержания высокого энергетического КПД добычи. Это связано с тем, что активные потери в двигателе не изменяются в зависимости от частоты ПЧ и скорости движения вторичного элемента, а вот полезная мощность тем больше, чем больше скорость движения штока и частота ПЧ. Такое возможно благодаря наличию датчика положения штока, питания ЦЛВД от ПЧ и низкой инерционности работы агрегата. После окончания рабочего цикла возможно временное отключение ЦЛВД, т.е. возникает работа в краткосрочном периодическом режиме. Это позволяет поддерживать постоянно высокий КПД добычного агрегата при любом дебите.

Также необходимо сравнить энергетические параметры нефтедобывающих агрегатов в зависимости от глубины добычи. Как видно из графиков, характеристика КПД для штангового привода плунжерного насоса падает быстрее из-за механических потерь на трение штанги о НКТ при ее изгибах. Но до глубины в 1,5 км применение штангового привода эффективнее из-за низкого КПД погружного привода на основе ЦЛВД. Таким образом, для обычных скважин проектируемый привод на основе ЦЛВД может быть более эффективным только для средних и глубоких малодобитных и среднедебитных скважин.

В то же время потери энергии привода ЦЛВД происходят в забое скважины. Но этот недостаток в ряде месторождений дает определенное преимущество нефтяному агрегату с ЦЛВД. Потери электрической энергии преобразуются в тепло в забое и разогревают нефтепродукт в скважине. Благодаря этому при добыче вязкой нефти и нефти с высоким содержанием парафинов не требуется установки дополнительных электрических нагревателей в забой. Именно в таком случае погружной скважинный насос с ЦЛВД будет наиболее эффективен. В среднем при статистических мощностях подогревателя скважины в 10–20 кВт суммарный энергетический КПД агрегата с штанговым насосом опускается настолько, что ЦЛВД будет выгоднее с глубины более 1 км. При этом есть месторождения, где мощность нагревателя в забое доходит до 50–80 кВт, что вдвое-втрое превышает затраты энергии на насосное оборудование. Для таких скважин рекомендуется применять ЦЛВД с любой глубины.

По результатам исследования можно сделать выводы:

1. Оценивать эффективность применения новых нефтедобывающих агрегатов того или иного исполнения можно по КПД, что влечет за собой требование регулирования производительности насосной установки.

2. Использование бесштанговой насосной установки позволяет:

– снизить металлоемкость и затраты на строительные и монтажные работы станков, фундаментов, штанговых колонн, затрат на подземные ремонты;

– снизить эмульгирование нефти в насосно-компрессорных трубах.

3. Исключение промежуточных звеньев привода станка и приближение двигателя к насосу обеспечат ряд существенных преимуществ. Кроме этого к проектируемому приводу нет жестких требований по глубине спуска в скважину, которая может достигать 3 км и более.

4. С учетом значительных запасов вязкой, парафиносодержащей нефти в России и недостаточности разработки таких месторождений следует признать их перспективность.

Библиографический список

1. Мирзин А.М., Коротаев А.Д., Шутемов С.В. Усилие тяжения цилиндрического линейного вентильного двигателя с постоянными магнитами между статором и вторичным элементом // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6.

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

3. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным управлением. – М.: Академия, 2006. – 272 с.

Сведения об авторах

Баянов Федор Николаевич – аспирант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ЭТЭ-17а, г. Пермь, e-mail: bayanoffedia@gmail.com.

Шулаков Николай Ваильевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: shulakov@pstu.ru.

Р.И. Газизов, А.Г. Щербинин

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПРОВИСАНИЯ СОСТЫКОВАННЫХ КАБЕЛЕЙ В ВУЛКАНИЗАЦИОННОЙ КАМЕРЕ НАКЛОННОГО ТИПА

В данной работе рассмотрена проблема возникновения дефектов изоляции при стыковке кабельных изделий разных маркоразмеров в наклонной вулканизационной трубе. На основе проведенного исследования предлагается методика расчета параметров провисания кабельного изделия в трубе с использованием уравнения цепной линии.

Ключевые слова: кабель, вулканизационная камера, кабельное изделие, провис, цепная линия.

R.I. Gazizov, A.G. Shcherbinin

CALCULATION OF DOCKED CABLE SLACK PARAMETERS IN THE VULCANIZATION CHAMBER OF AN INCLINED TYPE

In this article problems of occurrence of gulfs are considered at docking of a cable product of different markings. Based on the study, a technique is proposed for calculating the slack parameters of a cable product in a pipe using the equation of the catenary.

Keywords: cable, vulcanization chamber, cable product, sag, chain line.

Пероксидная сшивка полиэтиленовой изоляции кабелей на среднее и высокое напряжение происходит в наклонной вулканизационной трубе, имеющей геометрию цепной линии. Уравнение цепной линии оси наклонной трубы запишем в виде:

$$y = \frac{1}{k_0} \left[\cosh(k_0 l_0) - \cosh(k_0 (l_0 - x)) \right], \quad (1)$$

где k_0 – параметр линии, 1/м; x, y – координаты; l_0 – расстояние по горизонтали от головки экструдера до точки расположения затвора вулканизационной трубы; $\cosh(k_0 l_0)$ – гиперболический косинус.

Длина наклонных вулканизационных труб, как правило, достигает нескольких десятков метров. При этом заготовка, проходящая через камеру, имеет всего две точки опоры – в головке прессового агрегата и в вулканизационной трубе. При нарушениях технологического ре-

жима протяжки кабеля через вулканизационную трубу могут возникнуть ситуации, когда поверхность изоляции соприкасается с внутренними стенками вулканизационной камеры. Это приводит к повреждению изоляции и браку продукции. Если через вулканизационную камеру проходит кабель одного маркоразмера, то система автоматического управления по датчику, расположенному на середине вулканизационной линии, обеспечивает полное совмещение оси кабеля с осью вулканизационной трубы. Датчик представляет собой бесконтактную измерительную систему положения изолированной жилы.

Когда происходит переход с одного маркоразмера кабеля на другой с разными удельными массами, как это показано на рис. 1 и 2, невозможно обеспечить полное совпадение оси состыкованных кабелей с осью трубы. В результате этого вероятность появления дефекта изоляции существенно возрастает. В связи с этим разработка методики, позволяющей определять положение кабелей в вулканизационной трубе и находить параметры оптимального прохождения состыкованных кабелей, является актуальной задачей.

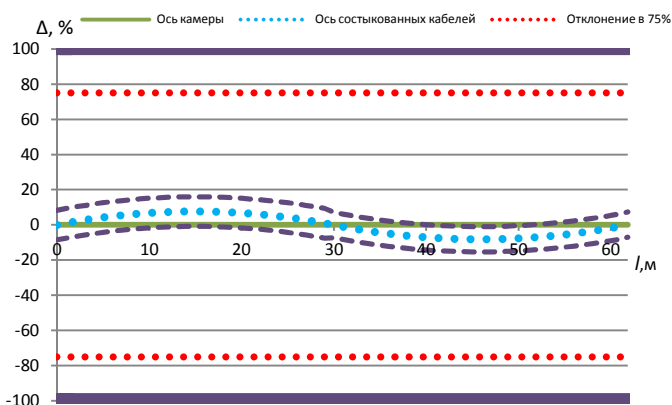


Рис. 1. Профиль отклонения оси состыкованных кабелей от оси камеры

Для этого итерационным способом определяется усилие натяжения T_{x1} для произвольной точки стыковки кабелей x_p, y_p , которая лежит на оси наклонной трубы (см. рис. 2).

Далее для каждого участка кабелей вводится своя локальная система координат (x_1, y_1) и (x_2, y_2) . Тогда координата стыковки кабелей в локальных системах координат определится как x_{p1}, y_{p1} и x_{p2}, y_{p2} .

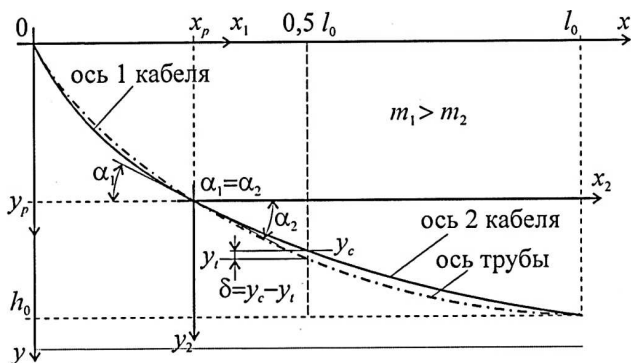


Рис. 2. Профиль стыкованных кабелей в наклонной трубе

Усилия натяжения кабелей определяется итерационным методом из условия:

$$T_{y1}|_{l=0} - T_{y2}|_{l=l_{22}} = s_1 m_1 g + s_2 m_2 g, \quad (2)$$

где T_{y1} и T_{y2} – проекции силы натяжения кабелей на ось y в начале и конце линии; m_1 и m_2 – удельные массы первого и второго участков кабелей; s_1 и s_2 – длины первого и второго участков кабелей.

Условие (2) обеспечивает равенство углов $\alpha_1 = \alpha_2$ (см. рис. 2).

Полученное значение усилия натяжения T_{x12} обеспечивается смещением оси кабеля относительно оси трубы в датчике на величину δ (см. рис. 2). При перемещении точки стыковки вдоль оси трубы получается зависимость смещения δ по координате x . Законом распределения $\delta = f(x)$ в датчике можно регулировать процесс прохождения состыкованных кабелей по трубе. По умолчанию в технологическом процессе величина δ задается равной нулю, что не обеспечивает оптимального прохождения состыкованных кабелей через вулканизационную трубу, имеющих разные удельные массы.

На основе предложенной методики был проведен анализ зависимости расположения состыкованных кабелей в вулканизационной камере наклонного типа при изменении диаметра изделия и удельных масс кабелей. Исследования проведены в соответствии со стандартным режимом прохождения кабелей (в датчике $\delta = 0$) и с корректировкой положения кабеля в датчике, которое обеспечивает оптимальное прохождение кабелей. Вначале фиксировался погонный вес первого участка

кабеля – $m_1 = \text{const}$. При этом вес второго участка увеличивался с шагом $h = 0,1$ кг/м. Затем, наоборот, фиксировался вес второго участка – $m_2 = \text{const}$, а первый при этом увеличивался с шагом $h = 0,1$ кг/м.

Для разности масс первого и второго участков кабелей была введена своя величина $F = m_1/m_2$ %. Помимо этого в вулканизационной камере были выбраны и зафиксированы два уровня минимально допустимого отклонения и максимального, при котором происходит соприкосновение изоляции с внутренними стенками вулканизационной камеры ($\Delta = 75$ % и $\Delta = 100$ %) (см. рис. 1).

Как только отклонение кабеля достигало этих отметок, в таблицу записывался показатель F для верхнего и нижнего предела отклонения. Затем увеличивался наружный диаметр изделия, и процедура повторялась несколько раз. На основе полученных данных были построены графики (рис. 3 и 4).

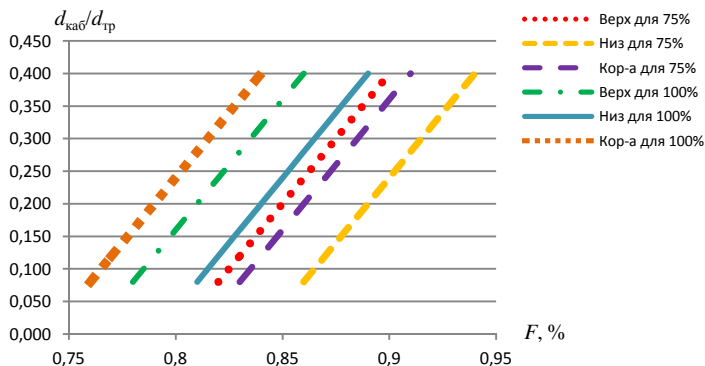


Рис. 3. Зависимость min и max отклонения Δ (75 и 100 %) для кабелей с разным диаметром в зависимости от разности масс (при $m_1 = \text{const}$)

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что чем больше разница между погонным весом первого и второго участков кабелей, тем раньше произойдет касание изоляции с внутренними стенками вулканизационной камеры. Также на приведенных графиках видно, что с увеличением диаметра изделия уменьшается допустимая разность масс между ними, поэтому стоит учитывать и этот фактор.

Помимо этого видно, что корректировка положения кабеля в датчике позволяет увеличить допустимую рабочую область при смене маркоразмеров. Тем самым ее использование позволит обеспечить предприятию дополнительные возможности.

Полученный результат может облегчить работу технолога. Ведь теперь при переходе с одного маркоразмера на другой нет нужды проводить дополнительные расчеты.

Опираясь на проведенный анализ, можно заранее предсказать, произойдет ли соприкосновение вулканизирующего материала с внутренними стенками вулканизационной камеры. Для этого необходимо знать лишь разницу погонного веса первого и второго участков кабелей и отношение диаметра кабеля к диаметру вулканизационной камеры.

Библиографический список

1. Холодный С.Д., Харченко Д.А. Расчет усилия натяжения кабельного изделия в вулканизационной камере наклонной кабельной линии непрерывной вулканизации // Кабели и провода. – 2009. – № 3. – С. 10–11.

2. Григорьян А.Г., Дикерман Д.Н., Пешков И.Б. Технология производства кабелей и проводов с применением пластмасс и резин. – М.: Машиностроение, 2011. – С. 210–211.

Сведения об авторах

Газизов Руслан Ильдарович – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КТЭ-16-1м, г. Пермь, e-mail: gazizovruslan_55@mail.ru.

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

Д.В. Гилев, С.В. Ершов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ВУЛКАНИЗАЦИИ РЕЗИНОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ НА РОТАЦИОННОМ РЕОМЕТРЕ DHR-2

На кабельных заводах в качестве изоляции и различных защитных покрытий широко используются вулканизированные резины. Процесс вулканизации позволяет придать готовому изделию необходимые механические характеристики. Для минимизации временных и материальных затрат на производстве, важным является экспериментальное исследование данного процесса, а также определение необходимого времени вулканизации в зависимости от состава резиновой смеси. В данной работе представлены результаты исследования различных составов резиновых смесей на ротационном реометре DHR-2. Получены графики зависимости крутящего момента от времени.

Ключевые слова: вулканизация, резина, резиновая смесь, изоляция, реология.

D.V. Gilev, S.V. Ershov

DETERMINATION OF THE TIME OF VULCANIZATION OF RUBBER INSULATION ON THE ROTATIONAL RHEOMETERS DHR-2

Vulcanized rubber are widely used as insulation and various protective covers in cable plants. The vulcanization process makes possible to give the necessary mechanical characteristics for the finished product. In order to minimize the time and material costs in production important things are experimental study for this process and also determining the necessary time of vulcanization depending on composition of the rubber compound. In this work the results of research of different compositions of rubber compounds are presented on a rotational rheometer DHR-2. Graphs of the dependence of the torque on time are obtained.

Keywords: vulcanization, rubber, rubber compound, insulation, rheology.

Технологически процесс вулканизации представляет собой преобразование в резину «сырого» каучука. Как химическая реакция, он предполагает объединение линейных каучуковых макромолекул, легко теряющих стабильность при внешнем воздействии на них, в единую вулканизационную сетку. Она создается в трехмерном пространстве благодаря поперечным химическим связям. Такая «сшитая» структура наделяет каучук дополнительными прочностными свойствами. Улучшаются его твердость и эластичность, морозо- и теплостойкость при

снижении показателей растворимости в органических веществах и набухания. Полученная сетка отличается сложным строением. Она включает не только узлы, соединяющие пары макромолекул, но и те, что объединяют одновременно несколько молекул, а также поперечные химические связи. Их образование происходит под действием специальных агентов, молекулы которых частично выступают строительным материалом, химически реагируя друг с другом и макромолекулами каучука при высокой температуре.

В работе были проведены экспериментальные исследования невулканизированных резиновых смесей, которые представляют собой композиции, состоящие из каучука (или смеси каучуков) и различных наполнителей. Испытания проводились на ротационном реометре DHR-2, в ходе эксперимента образец испытуемой резиновой смеси помещался между двумя параллельными пластинами диаметром 25 мм, одна из которых колеблется с небольшой угловой амплитудой, это вызывает в образце синусоидальную переменную деформацию кручения и синусоидальный сдвиговой крутящий момент, который зависит от жесткости (модуля сдвига) резиновой смеси (рис. 1).



Рис. 1. DHR-2 и электронный блок

Корпус реометра представляет собой жесткую цельную литую отливку, включающую в себя основание и стойку. Верхний элемент прибора прикреплен к шариковой направляющей, которая установлена в стойке. Вертикальное положение верхнего элемента контролируется датчиком.

ется закручиванием резьбы шариковой направляющей. Верхний элемент содержит следующее:

- асинхронный двигатель с чашеобразным полым ротором и арматуру, образующую вращающийся шпиндель реометра;
- магнитный упорный подшипник, поддерживающий приводной вал и два радиальных воздушных подшипника, которые его выравнивают;
- оптический кодер, определяющий его угловое положение.

В экспериментах использовалась измерительная система с электрическим подогревом (рис. 2). Данная конструкция печи позволяет достичь равномерного прогрева исследуемого образца. Также данный реометр имеет функцию активного температурного контроля, что позволяет напрямую контролировать температуру верхней и нижней пластин.



Рис. 2. Измерительная система «плоскость–плоскость» с электрическим подогревом серии Discovery

В процессе эксперимента жесткость образца возрастает по мере вулканизации резиновой смеси. Испытание считается завершенным, когда зарегистрированный крутящий момент возрастает до максимального постоянного значения. Кривая, представляющая крутящий момент, измеренный при максимальной деформации в одном направлении колебательного цикла, автоматически записывается как функция времени. Время вулканизации в минутах определяется по следующей формуле:

$$S = \left[M_L + \frac{x(M_H - M_L)}{100} \right],$$

где M_L – минимальный крутящий момент; M_H – максимальный крутящий момент, достигаемый в течение определенного промежутка времени в случае постоянно повышающейся кривой.

Экспериментальное исследование производилось для различных невулканизированных резиновых смесей марок: ИШМ-30 ВГ, ТСШ-33 ВГ, ШБМ-30/21, ЭНП-40, ЭПО-45 ВГ. Процесс вулканизации всех образцов производился при температурах, соответствующих технологическим режимам наложения, используемым на производстве. Результаты полученных экспериментальных зависимостей крутящего момента от времени приведены на рис. 3 и 4.

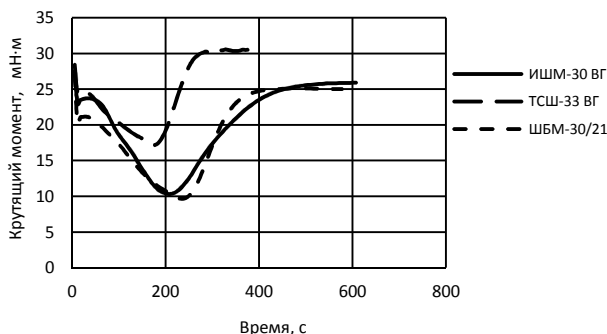


Рис. 3. График зависимости крутящего момента от времени вулканизации

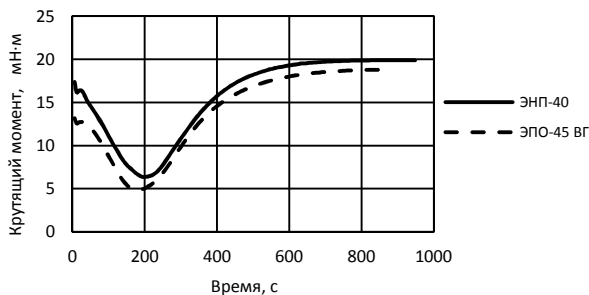


Рис. 4. График зависимости крутящего момента от времени вулканизации

Анализируя полученные результаты, можно отметить, что наименьшее время вулканизации составило 120 с для резины марки ТСШ-33 ВГ, в то время как для резины марки ИШМ-30ВГ потребовалось 310 с. Также стоит отметить, что для первой смеси наблюдается наибольшее значение крутящего момента при степени сшивки

100 % по сравнению с остальными резинами, что говорит о повышенной жесткости готового изделия из данного материала.

Данный метод позволяет произвести сравнительную оценку различных вулканизирующих агентов резиновых смесей, а также определить время, температуру и достаточную степень сшивки для достижения необходимых механических характеристик готового изделия. Таким образом, экспериментальное исследование процесса вулканизации позволяет сократить временные и материальные затраты на производстве при подборе технологического режима наложения изоляции и защитных покровов.

Библиографический список

1. ГОСТ 54547-2011 Определение вулканизационных характеристик с использованием безроторных реометров.
2. Рагулин В.В. Технология шинного производства – М.: Высшая школа, 1977. – 216 с.
3. Карпов В.Н. Оборудование предприятий резиновой промышленности. – М.: Химия, 2007. – 336 с.
4. Пичуев А.В., Трушников М.А. Разработка автоматизированной системы управления вулканизацией автомобильных покрышек.
5. Технология резиновых изделий / Ю.О. Аверко-Антонович, Р.Я. Омельченко, Н.А. Охотина, Ю.Р. Эбич; под ред. П.А. Кирпичникова. – Л.: Химия, 1991. – 352 с.
6. Шеин В.С., Шутилин Ю.Ф., Гриб А.П. Основные процессы резинового производства. – Л.: Химия, 1988.
7. White J.L. Rubber processing: technology, materials and principles. Hanser Publishers. – Munich, 1995.

Сведения об авторах

Гилев Дмитрий Васильевич – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. МЭ-14-16, г. Пермь, e-mail: d.gilev1@gmail.com.

Ершов Сергей Викторович – ассистент кафедры «Конструирование и технологии в электротехнике» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: ktei@pstu.ru.

Н.В. Жужгов, Г.В. Буторин, А.Т. Ключников

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

В работе исследованы варианты пуска СД с возбуждением при различных частотах порядка 2,5–10 Гц. Исследование режимов нагрузки осуществляется после синхронного пуска двигателя с возбуждением во всем диапазоне частот. Наброс нагрузки осуществляется через отрезок времени 0,5 с. При этом для различных частот мощность нагрузки оставалась неизменной. Вполне закономерно, что при малой частоте двигатель выпадает из синхронного режима. Исследован также генераторный режим с возбуждением в случае несинхронного режима.

Ключевые слова: синхронный двигатель, вентильный двигатель, пуск на низких частотах, наброс нагрузки.

N.V. Zhuzhgov, G.V. Butorin, A.T. Klyuchnikov

INVESTIGATION OF SYNCHRONOUS ENGINE OPERATION MODES

The variants of starting a synchronous motor with excitation at different frequencies of the order of 2,5–10 Hz are investigated. The load modes are investigated after synchronous starting of the engine with excitation in the entire frequency range. The load is loaded through a time interval of 0,5 s. With this at different frequencies, the load power remained unchanged. It is quite natural that at a low frequency the motor falls out of synchronous mode. The generation mode with excitation in case of falling out of the synchronous regime is also investigated.

Keywords: synchronous motor, valve motor, start at low frequencies, innings load.

Традиционно пуск синхронного двигателя (СД) осуществляется в асинхронном режиме с замкнутой обмоткой сопротивления на добавочное сопротивление [1]. При этом для СД применяют все способы пуска, которые используются для пуска асинхронного двигателя.

Способ пуска выбирается из режимов работы двигателя от величины момента сопротивления на валу. Все это сопровождается расчетами в настоящее время с помощью ЭВМ.

Современные методы исследования производятся в программной среде MatLab, которая позволяет моделировать и исследовать различные режимы пуска двигателя при различных напряжениях и частотах.

В работе исследован пуск СД при различных параметрах источника питания и момента сопротивления на валу двигателя. Исследования были произведены на моделях, собранных в программной среде MatLab.

1. Описание исследуемой модели. Для исследования различных режимов после пуска СД в программной среде MatLab была собрана модель [2], схема которой представлена на рис. 1.

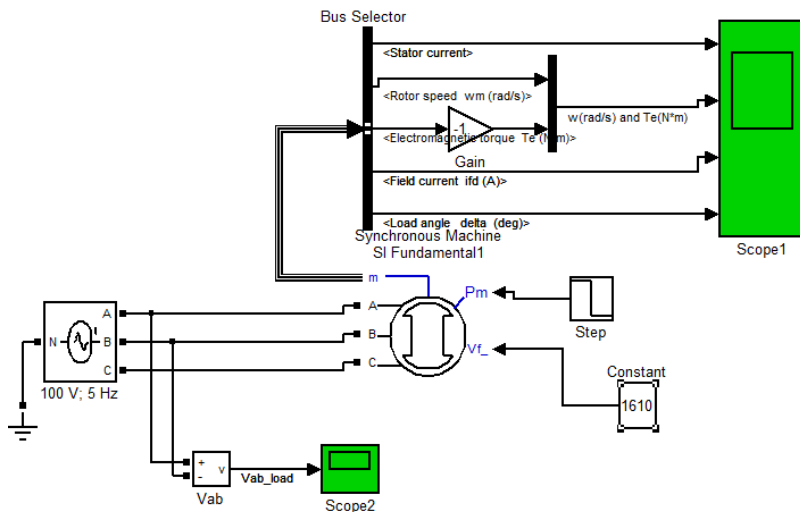


Рис. 1. Схема модели для исследования режимов СД

Схема состоит из трехфазного источника напряжения (А, В, С), синхронного двигателя, блоков для установки напряжения возбуждения и момента сопротивления, а также блоков для вывода измеряемых величин. У источника трехфазного – напряжения можно изменять действующее значение напряжения питания и частоту [3]. В нашем случае для СД выбраны базовые величины – напряжение 100 В с частотой 5 Гц. В синхронном режиме сигнал, соответствующий механической мощности на валу двигателя, подается на входной порт P_m , также на этот порт можно подавать сигнал в виде скорости w для исследования СД в генераторном режиме. С помощью блока Step задается момент сопротивления, соответствующий механической мощности P_m на валу двигателя, либо скорость w . При этом в блоке можно задавать время подачи и величину задающего сигнала (P_m или w). Порт V_f служит для подачи напряжения возбуждения на СД, приведенное значение

которого задается в блоке Constant. Кроме этого для измерения переменных СД служит блок Bus Selector. Для вывода измеряемых переменных на экран предназначен блок Score.

В работе исследованы установившиеся режимы после пуска СД.

2. Исследование режимов работы СД под нагрузкой. На рис. 2 представлены расчётные графики режима нагрузки СД при напряжении 100 В и частоте 5 Гц. Момент сопротивления определяется мощностью P_m , которая равна 30 Вт, и через 0,5 с увеличивается до 260 Вт.

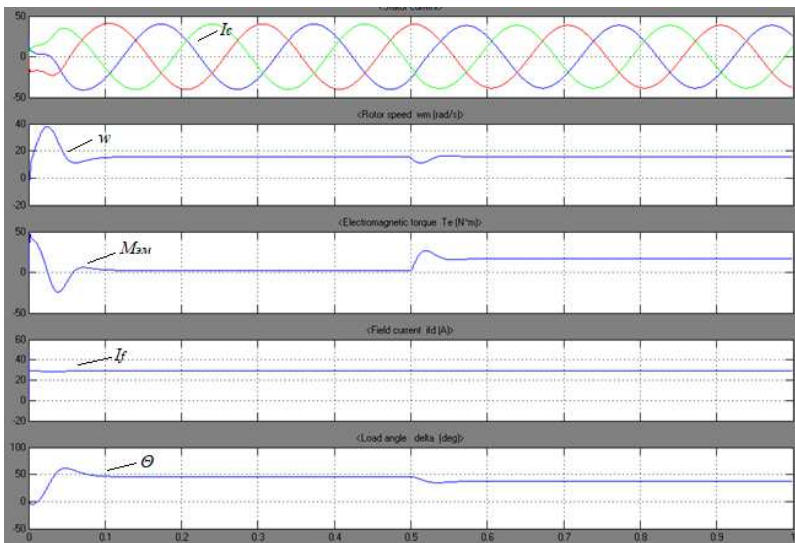


Рис. 2. Режим нагрузки СД при напряжении 100 В и частоте 5 Гц

Исходя из результатов, представленных на рис. 2, двигатель запускается через 0,13 с, что сопровождается ударными токами $I_{уд} = 46,8$ А и электромагнитным моментом $M_{эм. уд} = 48$ Нм.

В интервале времени от 0,13 до 0,5 с наступает установившийся процесс, когда ток статора составляет порядка $I_c = 45$ А, который является активно-индуктивным [1], так как ток возбуждения менее номинального $I_{н.}$ Электромагнитный момент $M_{эм} = 2,24$ Нм, так как нагрузка мала. Скорость ротора соответствует синхронной при частоте питания 5 Гц и составила $\omega = 15,7$ рад/с. Ток возбуждения составляет $I_f = 29$ А, а угол нагрузки $\Theta = 48,4^\circ$. В момент времени 0,5 с подан момент сопротивления, которому соответствует мощность (P_m)

260 Вт. С увеличением нагрузки ток статора практически не изменился, а электромагнитный момент возрос до $M_{эм}=16,86$ Нм, что соответствует физике процесса. После наброса нагрузки и соответствующего переходного процесса скорость ротора сохранилась синхронной. Экспериментальное значение электромагнитной мощности (1) можно считать следующим образом:

$$P_{эм} = M_{эм} \cdot \omega = 16,86 \cdot 15,7 = 264,7 \text{ Вт.} \quad (1)$$

Исходя из представленных результатов расчета, СД двигатель запускается при напряжении 100 В и частоте 5 Гц. При заданных изменениях момента сопротивления не выходит из синхронизации.

На рис. 3 показан вариант нагрузки СД при напряжении 100 В и частоте 10 Гц. Мощность P_m подана той же величиной, как и для варианта, представленного ранее.

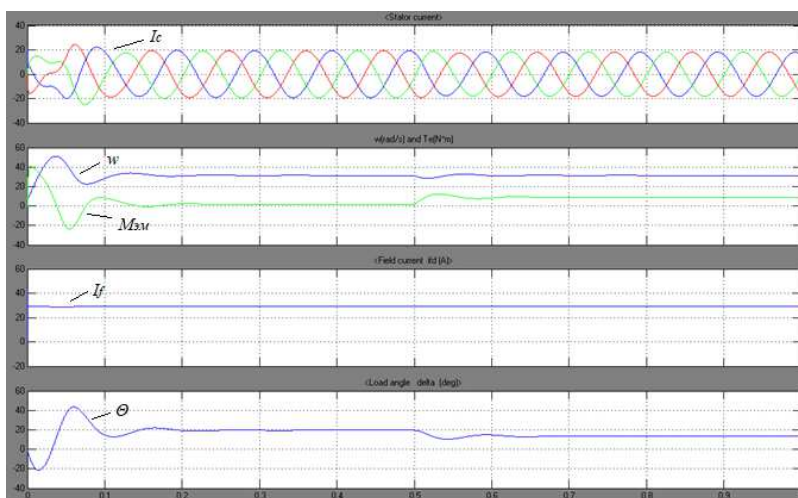


Рис. 3. Режим нагрузки СД при напряжении 100 В и частоте 10 Гц

При увеличении частоты напряжения увеличивается скорость ротора, следовательно, время пуска и синхронизации возрастают по времени. На рис. 3 время пуска, действительно, увеличилось до 0,2 с. Однако ток статора как ударный, так и пусковой уменьшился примерно в 2 раза. Ударный электромагнитный момент незначительно изменился, $M_{эм,уд} = 40$ Нм, как и электромагнитный момент на интервале времени от 0,3 до 0,5 с $M_{эм} = 1,6$ Нм, но в меньшую

сторону. Ток возбуждения остался практически такой же на всем интервале времени.

В момент времени 0,5 с подан момент сопротивления, которому соответствует мощность (P_m) 260 Вт. Как и в предыдущем варианте, с увеличением нагрузки ток статора практически не изменился, а установившийся электромагнитный момент уменьшился примерно в 2 раза ($M_{эм} = 8,89$ Нм) по сравнению с частотой питания 5 Гц, что соответствует физике процесса. После наброса нагрузки скорость ротора при частоте питания 10 Гц осталась синхронной и составила $\omega = 31,4$ рад/с. Экспериментальное значение электромагнитной мощности (2) определяется как

$$P_{эм} = M_{эм} \cdot \omega = 8,89 \cdot 31,4 \approx 279 \text{ Вт.} \quad (2)$$

Исходя из полученных результатов, СД двигатель запускается при напряжении 100 В и частоте 10 Гц медленнее, чем при частоте 5 Гц. Но при этом пуск двигателя и последующая синхронизация сопровождаются меньшими ударными и пусковыми токами.

На рис. 4 показан вариант нагрузки СД при напряжении 100 В и частоте 2,5 Гц при тех же мощностях P_m на валу двигателя.

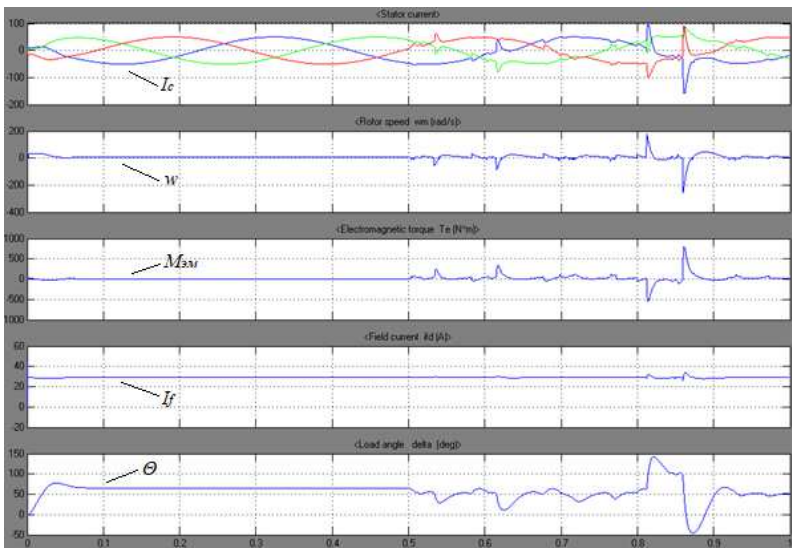


Рис. 4. Режим нагрузки СД при напряжении 100 В и частоте 2,5 Гц

Как видно из графиков (см. рис. 4), двигатель запускается и достигает синхронной скорости через 0,1 с, которая составила $\omega = 7,85$ рад/с. С уменьшением частоты время разгона сократилось по сравнению с пуском при частоте 10 Гц примерно в 2 раза. В момент времени 0,5 с, когда был подан повышенный момент сопротивления, двигатель примерно через 0,02 с выпадал из синхронизма. Следовательно, СД-двигатель запускается при напряжении 100 В и частоте 2,5 Гц, но при этом не способен выдерживать увеличенный момент сопротивления на валу. При этом во всех трех случаях мощность P_m оставалась 260 Вт.

Далее исследованы режимы, когда скорость ротора двигателя определяется скоростью ω вместо мощности P_m . Для этого необходимо в параметрах блока СД в строке *Mechanical input* установить значение *Speed*. Рассмотрен следующий режим: в источнике питания установлено напряжение 100 В и частота 5 Гц. Порт *Speed* определяет скорость ротора $\omega = 25,12$ рад/с, которая соответствует частоте питания 8 Гц, а через 2,5 с скорость меняется на 2 Гц, т.е. $\omega = 6,28$ рад/с. Полученные результаты представлены на рис. 5.

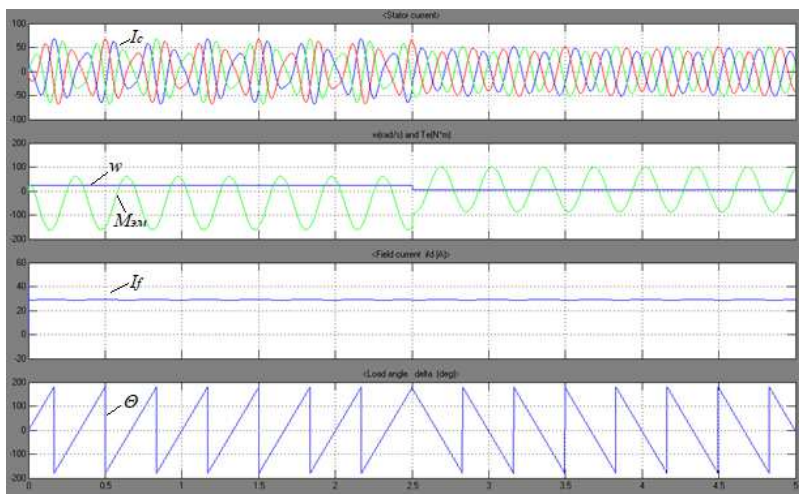


Рис. 5. Генераторный режим (8 Гц) и режим нагрузки (2 Гц) СД при напряжении 100 В и частоте 5 Гц

Как видно из графиков, представленных на рис. 5, скорость согласно заданию не изменяется. То есть рассматривается случай, когда вал СД жестко сцеплен с мощным механизмом, который задает

скорость вращения. А двигатель может переходить из генераторного в асинхронный режим.

На интервале времени от 0 до 2,5 с скорость вращающего механизма больше, чем базовая скорость вращения двигателя, т.е. соответствует генераторному режиму. Видно, что электромагнитный момент изменяется по закону синуса с периодом $T = 0,35$ с, это обусловлено наличием тока возбуждения. Ток возбуждения изменяется по закону синуса с таким же периодом, как и электромагнитным момент, но в противофазе с ним. Также следует отметить, что среднее значение электромагнитного момента меньше нуля, что также свидетельствует о генераторном режиме.

На интервале времени свыше 2,5 с наблюдается асинхронный режим работы двигателя, на что указывает изменение направления угла нагрузки. Среднее значение электромагнитного момента стало положительным, т.е. двигатель работает в асинхронном режиме, так как синхронной скорости не достиг. Электромагнитный момент, как и ток возбуждения, изменяется по закону синуса с периодом $T = 0,31$ с. В момент возрастания тока возбуждения искажаются графики токов статора.

Заключение

1. Проведенные исследования режима наброса нагрузки при различных частотах показали возможность синхронного пуска в диапазоне частот от 2,5 до 10 Гц.

2. Наброс нагрузки при постоянной мощности P_m на валу сопровождается увеличением момента сопротивления при снижении частоты питающего напряжения. Это закономерно, двигатель при малой частоте питания (2,5 Гц) выпадает из синхронного режима.

3. Согласно закону Костенко при снижении питающей частоты необходимо уменьшать напряжение питания, но результаты исследования показали, что даже при неизменном напряжении в диапазоне частот 2,5–10 Гц двигатель выпал из синхронизма. Следовательно, закон Костенко здесь не применим.

Библиографический список

1. Кононенко Е.В. Сипайлов Г.А., Хорьков К.А. Электрические машины (спец. курс): учеб. пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1975. – 279 с.

2. Дьяков В.П. Simulink 5/6/7: самоучитель. – М.: ДМК-Пресс, 2008. – 784 с.

3. 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.

Буторин Георгий Васильевич – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ЭМ-14-1пб, г. Пермь, e-mail: zhora20091@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.С. Зыков, Н.М. Труфанова

ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ МУФТОВОГО КАБЕЛЬНОГО СОЕДИНЕНИЯ И ЕГО ВЛИЯНИЯ НА ПРОПУСКНУЮ СПОСОБНОСТЬ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ

В данной статье была проведена оценка влияния муфтового соединения на пропускную способность кабельных линий. Реализация задачи осуществлялась численным методом конечных элементов, путем совместного решения задач теплопереноса и электромагнетизма. Определены распределения температурных полей в кабельной муфте.

Ключевые слова: кабельная муфта, распределение температурного поля.

A.S. Zykov, N.M. Trufanova

NUMERICAL EVALUATION OF THE TEMPERATURE FIELD OF THE CABLE COUPLING AND ITS EFFECT ON THE CABLE LINE CAPACITY

In this article, an assessment was made of the effect of a coupling on the capacity of cable lines. The realization of the problem was carried out by a numerical finite element method, by the joint solution of the problems of heat transfer and electromagnetism. The distribution of temperature fields in the cable box is determined.

Keywords: cable coupling, distribution of the temperature field.

При передаче электрической мощности на большие расстояния применяют несколько строительных длин, которые соединяются друг с другом кабельными муфтами.

Монтаж кабельных муфт проводится в полевых условиях, и качество соединения зависит от ряда факторов, таких как квалификация монтажника, окружающие погодные условия. Большая часть отказов кабельных линий происходит в кабельных муфтах.

Силовой кабель ПвВ-1х400-10кВ и муфта представляют собой многослойную конструкцию, представленную на рис. 1.

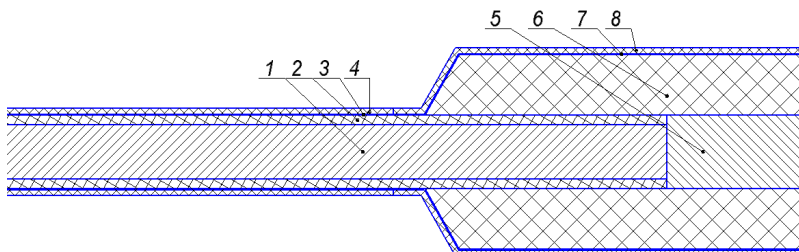


Рис. 1. Конструкция силового одножильного кабеля и муфты: 1 – токопроводящая жила (ТПЖ); 2 – фазная полимерная изоляция; 3 – металлический экран кабеля; 4 – полимерная оболочка кабеля; 5 – болтовое соединение ТПЖ; 6 – полимерная изоляция муфты; 7 – металлический экран муфты; 8 – полимерная оболочка муфты

В таблице приведены конструктивные размеры элементов кабеля и муфты.

Конструктивные размеры элементов кабеля и муфты

Элемент конструкции модели	Материал	Внешний диаметр, мм	Внутренний диаметр, мм	Толщина элемента, мм
ТПЖ	Медь	11,9	–	–
Изоляция кабеля	Сшитый полиэтилен	16	11,9	4,1
Экран кабеля	Медь	16,5	16	0,5
Оболочка кабеля	ПВХ	19	16,5	2,5
Болтовое соединение	Алюминий	16	–	–
Изоляция муфты	Сшитый полиэтилен	42,4	16	26,4
Экран муфты	Медь	42,9	42,4	0,5
Оболочка муфты	ПВХ	45,4	42,9	2,5

Математическая модель, описывающая процессы теплопереноса (1) и электромагнетизма (2) в кабельной линии и муфте, основанная на законе сохранения энергии, в дифференциальной постановке имеет следующий вид:

$$\rho_i c_i \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} + u_i \frac{\partial T}{\partial y_i} + u_i \frac{\partial T}{\partial z_i} \right) = -\lambda_i \Delta T + q_v, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_i} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_i} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) - j\omega \sigma_i A_z + J^i = 0, \quad (2)$$

где i – номер элемента в исследуемой области (см. рис. 1), x_i – декартовые координаты; ρ_j, c_j, λ_j – плотность, теплоемкость, коэффициент теплопроводности жилы, изоляции и муфты, кг/м³, Дж/кг·°C, Вт/м·°C; T – температура, °C; q_v – мощность внутренних источников тепла в токопроводящей жиле, болтовом соединении и металлических экранах, в уравнении для изоляции, оболочки и окружающей среды данная составляющая отсутствует, Вт/м³; t – время процесса, с, ω – круговая частота, рад/с; A_z – компонента векторного магнитного потенциала, Вб/м; J – плотность тока в токопроводящей жиле, металлических экранах и болтовом соединении, А/м², μ – магнитная проницаемость ТПЖ, металлических экранов, болтового соединения и воздуха, Гн/м; σ – коэффициент удельной электропроводности токопроводящей жилы, металлических экранов и болтового соединения, См/м.

При этом были сделаны следующие допущения:

- теплофизические и электродинамические характеристики используемых материалов постоянны и изотропны;
- контактным сопротивлением болтового соединения пренебрегаем;
- фазные токи синусоидальны и сбалансированы;
- все величины поля изменяются синусоидально во времени;
- токами смещения пренебрегаем.

Граничные условия:

- на твердых границах контакта разнородных сред: жила-изоляция; жила-муфта задаются условия 4-го рода и равенство температур;
- на поверхности изоляции и муфты задается граничное условие конвективного теплообмена. Задаются α – коэффициент теплоотдачи с поверхности муфты и изоляции в окружающую среду, $\alpha = 10 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{°C}$ и $T_{\text{ср}} = 18 \text{ °C}$ – температура окружающей среды;
- на торцевой стороне кабеля задаются адиабатические условия по температуре.

Реализация разработанной математической модели осуществлялась методом конечных элементов в среде ANSYS. Дискретный аналог модели выстроен с помощью блочной структуры, которая в дальнейшем была разбита на сетку.

На рис. 2 представлен график распределения температуры вдоль оси жилы по длине кабеля с муфтой при прокладке кабеля в земле.

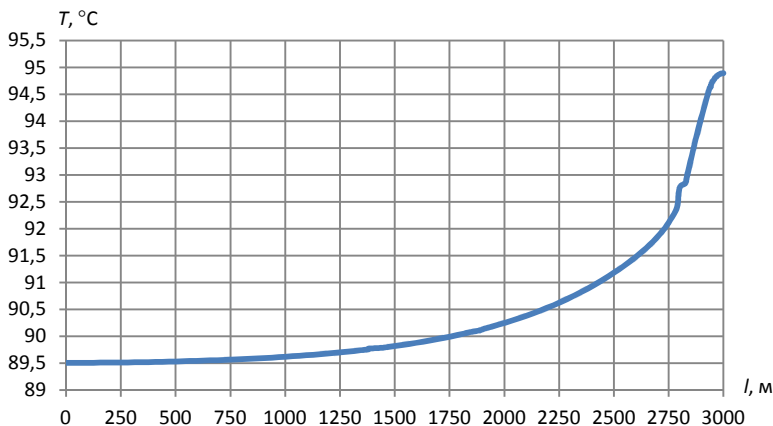


Рис. 2. График распределения температуры вдоль оси жилы по длине кабеля с муфтой при прокладке кабеля в земле

Из рис. 2 видно, что токовая нагрузка обеспечивает крайне допустимую температуру в силовом кабеле. Температура в муфте превышает максимально допустимую для применяемого типа изоляции.

Библиографический список

1. Федорова Н.Н. Основы работы в ANSYS 17. – СПб.: ДМК-Пресс, 2016.
2. ГОСТ Р 55025-2012. Кабели силовые с пластмассовой изоляцией на номинальное напряжение от 6 до 35 кВ включительно.

Сведения об авторах

Зыков Антон Сергеевич – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КТЭ-17-1м, г. Пермь, e-mail: toni.zykov.95@mail.ru.

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

Н.В. Истомин, Н.М. Труфанова

**ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ТОКОВУЮ
ПЕРЕДАВАЕМУЮ МОЩНОСТЬ КАБЕЛЕЙ,
ПРОЛОЖЕННЫХ ПО МОСТУ**

В данной статье рассмотрена трехмерная математическая модель тепло-массопереноса при прокладке кабельных линий по мосту. Произведён анализ влияния климатических факторов на передаваемую мощность кабелей, с учетом конвективного теплообмена, солнечной радиации, а также движения воздуха. Используя программное обеспечение Ansys, Ansys Fluent, были составлены модули расчета конечных элементов, учитывающие климатические условия, геометрические размеры и теплофизические свойства материалов. В результате решения задачи сложного теплопереноса получены распределения полей скоростей и температур для различных погодных условий. Определено воздействие окружающей среды на изменение длительно допустимых токовых нагрузок.

Ключевые слова: математическая модель, кабельная линия, температурное поле, токовая нагрузка.

N.V. Istomin, N.M. Trufanova

**THE INFLUENCE OF CLIMATIC CONDITIONS
ON THE CURRENT TRANSMITTED POWER OF CABLES
PAVED ON THE BRIDGE**

The paper deals with a three-dimensional mathematical model of heat and mass transfer when laying cable lines over a bridge. An analysis of the climatic factor influence on the transmitted power of the cables, taking into account convective heat transfer, solar radiation, as well as air movement is conducted. Using the software support Ansys, Ansys Fluent, the finite element calculation modules were developed, taking into account the climatic conditions, geometric dimensions and thermophysical properties of the materials. As a result of solving the problem of complex heat transfer, the velocity and temperature fields distributions for various weather conditions were obtained. The influence of the environment on the change in the long-term current loads is determined.

Keywords: mathematical model, cable line, temperature field, current load.

Для определения величины максимальной токовой нагрузки кабеля, проложенного по мосту для заданных погодных условий, рассматривается трехмерная математическая модель тепломассопереноса в кабеле и окружающем пространстве. Проведение численных ис-

следований позволяет учитывать теплофизические свойства материалов, условия эксплуатации, а также конвективный теплообмен и солнечную радиацию. На данный момент решения таких задач практически нет. Анализу тепловых полей при различной прокладке кабелей посвящен ряд статей. В статье [1] рассматривалась прокладка кабеля в земле с учетом конвективного теплообмена в трубе. Расчету тепловых процессов одножильного кабеля, проложенного на воздухе, посвящена работа [2]. Модель, учитывающая естественную конвекцию и лучистую энергию в кабельном поземном канале, приведена в статье [3]. На сегодняшний день остаются неизученными процессы тепломассопереноса для кабеля, проложенного по мосту

Исследуемая модель движения и теплопереноса основана на законах сохранения массы, количества движения и энергии. Процесс описывается следующими дифференциальными уравнениями:

– уравнение движения воздуха:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_x}{\partial \tau} + U_x \frac{\partial U_x}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_x}{\partial y} + U_z \frac{\partial U_x}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial U_x}{\partial y} + \\ + \frac{\partial}{\partial z} \mu \frac{\partial U_x}{\partial z}, \\ \frac{\partial U_z}{\partial \tau} + U_x \frac{\partial U_z}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_z}{\partial y} + U_z \frac{\partial U_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial U_z}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial U_z}{\partial y} + \\ + \frac{\partial}{\partial z} \mu \frac{\partial U_z}{\partial z}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_y}{\partial \tau} + U_x \frac{\partial U_y}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_y}{\partial y} + U_z \frac{\partial U_y}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial U_y}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \mu \frac{\partial U_y}{\partial z} + \\ + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial U_y}{\partial y} + \frac{g\beta(T - T_0)}{\rho}; \end{aligned} \quad (2)$$

– уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + U_x \frac{\partial \rho}{\partial x} + U_y \frac{\partial \rho}{\partial y} + U_z \frac{\partial \rho}{\partial z} = \rho \left(\frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_y}{\partial y} + \frac{\partial U_z}{\partial z} \right); \quad (3)$$

– уравнение энергии для воздуха:

$$\rho_b c_b \left(\frac{\partial t}{\partial \tau} + U_x \frac{\partial t}{\partial x} + U_y \frac{\partial t}{\partial y} + U_z \frac{\partial t}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \lambda_b \frac{\partial t}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \lambda_b \frac{\partial t}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \lambda_b \frac{\partial t}{\partial z}; \quad (4)$$

– уравнение теплопроводности для кабельных линий:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_{\text{и}} \frac{\partial t}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_{\text{и}} \frac{\partial t}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_{\text{и}} \frac{\partial t}{\partial z}\right) + q_v = 0; \quad (5)$$

– уравнение теплопроводности для твердых материалов:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_i \frac{\partial t}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_i \frac{\partial t}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_i \frac{\partial t}{\partial z}\right) = 0. \quad (6)$$

Плотность воздуха зависит от температуры по закону Буссинеска:

$$\rho_v(T) = \rho_0[1 - \beta(t - t_0)], \quad (7)$$

где x, y , – декартовы координаты; U_x, U_y, U_z – компоненты вектора скорости воздуха в канале; t – температура, °C; P – отклонения давления воздуха от гироскопического; g – ускорение свободного падения; ρ_v, μ_v, c_v – плотность, вязкость и теплоемкость воздуха; ρ_0 – плотность воздуха при температуре $t_0 = 20$ °C, q_v – мощность внутреннего источника тепла; β – температурный коэффициент плотности воздуха; $\lambda_v, \lambda_{\text{и}}, \lambda_i$ – теплопроводность воздуха, изоляции и твердых материалов прокладки соответственно.

Мощность внутреннего источника тепла в ТПЖ определяется по закону Джоуля–Ленца по формуле:

$$q_{v1} = \iint_S \frac{I_1^2}{\sigma_5} dS, \quad (8)$$

где I_1 – номинальный ток жилы силового кабеля, А; σ_5^1 – коэффициент удельной электропроводности токопроводящей жилы, См/м.

При создании модели сделаны допущения: теплофизические свойства твердых материалов постоянны; течение воздуха ламинарное; процесс стационарный.

Данная математическая модель тепломассопереноса реализована в программном комплексе ANSYS методом конечных элементов. Исследуемая область представляет собой прямоугольный массив, заполненный воздухом. Размеры области: 20 м ширина и 30,45 м высота, длина 50 м. По центру располагается балочная конструкция моста. Кабельные линии расположены под мостом [4]. Теплофизические свойства твердых материалов постоянны [5]. Скорость потока воздуха 2 м/с. Температура окружающей среды в начальный момент составляет 30 °C. Для учета солнечной радиации использовались модели Surface To Surface и Solar Ray Tracing.

Реализация построенной математической модели происходила в ANSYS ICEM. Сетка конечных элементов представлена на рис. 1.

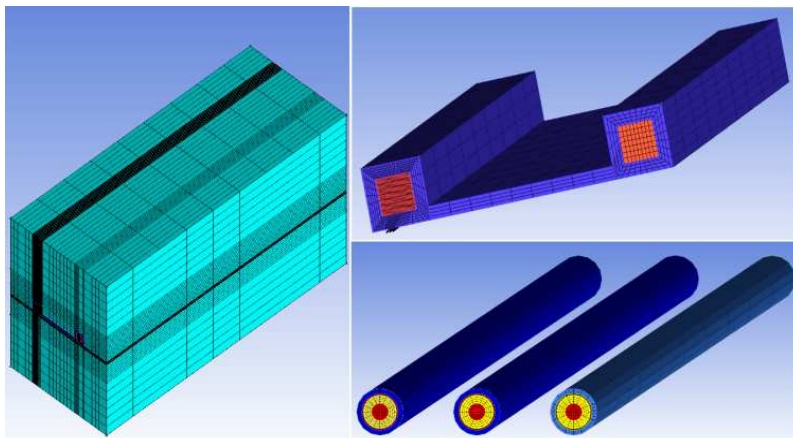


Рис. 1. Сетки конечных элементов: *а* – расчетная область, *б* – мост, *в* – кабельные линии

В работе проведено исследование влияния различных погодных условий на величину передаваемой мощности кабельных линий и максимальную температуру изоляции кабелей, которая не должна превышать рабочую температуру 90 град.

В результате решения, были получены поля распределения температур в области прокладки кабельных линий для различных вариантов расчета, представленных в таблице и на рис. 2.

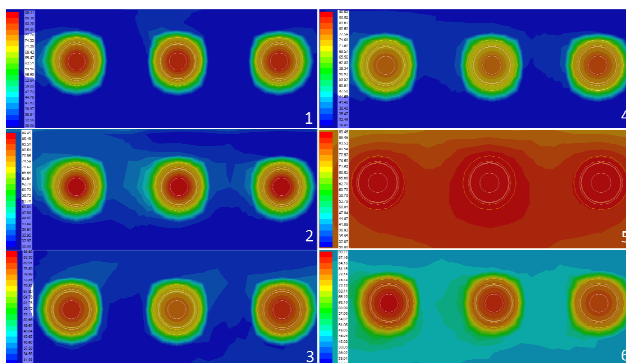


Рис. 2. Поля распределения температур

Видно, что наибольшая температура реализуется для варианта 5, когда не учитывается конвекции воздуха. Вариант 3, соответствующий условиям «вынужденная конвекция» без учета радиации, является наилучшим с точки зрения величины передаваемой мощности.

Результаты допустимых токовых нагрузок

№ п/п	Вынужденная конвекция	Теплофизические характеристики воздуха зависят от температуры	Солнечная радиация	Длительно допустимый ток, А	Снижение тока*, %
1	+	–	+	378	26
2	+	+	+	389	23
3	+	+	–	508	1
4	+	–	–	463	9
5	–	–	–	82	83
6	–	+	–	454	10

* – от величины тока при погодных условиях с учетом влияния ветра и конвективного теплообмена, солнечная радиация не учитывается.

ГОСТ: допустимая токовая нагрузка при прокладке на воздухе (в плоскости) 426 А.

Из таблицы следует, что наибольшие токовые нагрузки были получены при наличии вынужденного конвективного теплообмена, поверхность кабелей охлаждается интенсивнее. При наличии солнечной радиации допустимая токовая нагрузка снижается, так как нагревается поверхность балочной конструкции моста. Величина допустимого тока в этом случае составляет 389 А.

Закключение: допустимая передаваемая мощность кабельных линий зависит от погодных условий, влияние солнечных лучей значительно снижает величину нагрузку кабельных линий.

Библиографический список

1. Труфанова Н.М., Будаян В.А. Нестационарная задача тепло-массопереноса при прокладке кабеля в зданиях и сооружениях // Электротехника. – 2017. – № 3. – С. 6–16.
2. Ларина Э.Т. Расчет переходных тепловых процессов одно-жильного силового кабеля с пластмассовой изоляцией, проложенного в воздухе // Электротехника. – 1991. – № 10. – С. 39–42.

3. Навалихина Е.Ю. Численное исследование нестационарного режима работы кабельных линий, проложенных в подземном канале // Научно-технический вестник Поволжья. – 2013. – № 3. – С. 38–41.

4. Истомин Н.В., Труфанова Н.М.. Анализ температурного поля кабельной линии, проложенной по мосту, и выбор ее рационального расположения // Электротехника. – 2018. – № 1. – С. 36–48.

5. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов. – М.: Физматгиз, 1959. – 356 с.

Сведения об авторах

Истомин Никита Владимирович – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КТЭ-17-1м, г. Пермь, e-mail: nike62610@gmail.com.

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

А.И. Кабирова, А.Г. Щербинин

РАСЧЁТ ИНДУКТИВНОСТЕЙ КАБЕЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

В данной статье рассмотрены проблемы определения индуктивности силовых кабелей. Рассматривалась конструкция силовых шахтных кабелей с тремя медными токопроводящими жилами секторной формы с фазной изоляцией из ПВХ пластиката с сечением сектора 240 мм². Цель исследования – определение индуктивности силовых кабелей секторных токопроводящих жил.

Ключевые слова: индуктивность, изоляция, токопроводящая жила круглой и секторной формы.

A.I. Kabirova, A.G. Shcherbinin

CALCULATION OF INDUCTIVITY OF CABLES BY MEANS OF MATHEMATICAL MODELING OF MAGNETIC FIELDS

In this paper, inductance of power cables is considered. The design of the power mine cables with three copper conductor of a sector form with isolation from the sewed PVC with the sector-shaped cross-section of 240 mm² was considered. The purpose of the research is determination of inductance of power cable sector-shaped conductor

Keywords: inductance, insulation, current-carrying conductor, conductor of round and sector-shaped.

Для определения индуктивности силовых кабелей необходимо решать магнитостатическую задачу.

Поскольку изменение магнитного поля происходит в поперечном сечении кабеля, дифференциальные уравнения для векторного магнитного потенциала A для проводящей и диэлектрической среды выглядят следующим образом:

– проводящая среда:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_a} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_a} \frac{\partial A}{\partial y} \right) + J = 0; \quad (1)$$

– диэлектрическая среда:

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

где A – магнитный потенциал (в двухмерной постановке направлен по координате z); μ_a – абсолютная магнитная проницаемость; σ – удельная электропроводность; J – плотность тока.

Заданная величина тока в проводнике:

$$I = J \cdot S_C \quad (3)$$

где S_C – площадь поперечного сечения проводника.

Равенство нулю векторного магнитного потенциала на бесконечно удаленной границе реализуется с помощью граничного условия Робина:

$$\frac{\partial A}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho} A = 0. \quad (4)$$

Решение данной задачи проводилось с помощью программного пакета моделирования ANSYS Maxwell методом конечных элементов. По полученному распределению векторного магнитного потенциала вычислялась индуктивность. В результате решения формируется матрица индуктивных коэффициентов, через которую в дальнейшем считается полная индуктивность.

Для проверки адекватности определения индуктивности производилось сравнение с аналитическим решением. Рассмотрены ТПЖ круглого сечения (рис. 1).

Для исследования в качестве примера были взяты конструкции ТПЖ шахтных кабелей с разными толщинами изоляций (рис. 2). Три ТПЖ с сечением 240 мм^2 . Толщина изоляции изменялась с шагом 1 мм (с 1 до 6 мм). Соответственно, рассчитанный диаметр ТПЖ составил 17,48 мм (с учетом коэффициента уплотнения 1).

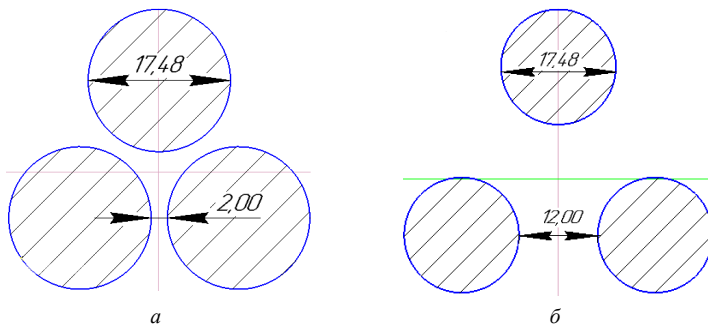


Рис. 1. Сечение изолированной токопроводящей жилы круглой формы:
 a – с толщиной изоляции 1 мм; b – с толщиной изоляции 6 мм



Рис. 2. Конструкция силового шахтного кабеля марки КШВЭБШв

Аналитическое определение индуктивности. Расчёт индуктивности трехпроводной линии проведен методикой, описанной в книге П.Л. Калантарова и Л.А. Цейтлина.

Вычисление индуктивности необходимо в случае, если поперечные размеры ТПЖ не очень малы, по сравнению с расстояниями между проводниками. Это существенно в расчёте кабелей (а именно в кабельных линиях).

Полная индуктивность трехпроводной линии определяется по формуле:

$$L_p = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{d}{r} + \frac{1}{4} \right), \quad (5)$$

где d – расстояние между осями ТПЖ; r – радиус сечения ТПЖ.

В таблице представлена индуктивность, которая рассчитана в программном пакете Maxwell и аналитическим методом.

Индуктивность кабелей с круглыми токопроводящими жилами

Метод решения	Толщина изоляции					
	1 мм	2 мм	3 мм	4 мм	5 мм	6 мм
Аналитический метод, Гн	2,103	2,29842	2,4765	2,64075	2,79182	2,93228
	E-07	E-07	E-07	E-07	E-07	E-07
Численный метод, Гн	2,101	2,29587	2,4733	2,63597	2,78657	2,9255
	E-07	E-07	E-07	E-07	E-07	E-07
Отклонение, %	0,084	0,111	0,128	0,182	0,189	0,232

Из таблицы видно, что численные и аналитические данные отличаются не более чем на 1 %. Следовательно, данные, полученные в программном пакете ANSYS Maxwell, верны.

Далее проводились исследования зависимости индуктивности кабелей секторных ТПЖ от толщины изоляции (рис. 3).

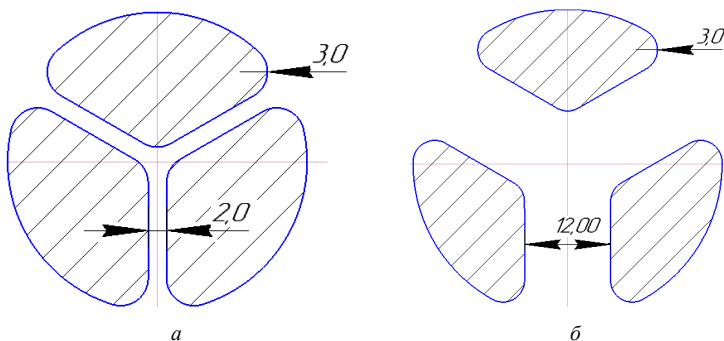


Рис. 3. Сечение изолированной токопроводящей жилы секторной формы:
а – с толщиной изоляции 1 мм; б – с толщиной изоляции 6 мм

На рис. 4 приведено сравнение индуктивностей ТПЖ разной формы. Сравнивая, видно, что индуктивность секторных ТПЖ с одной и той же толщиной изоляции выше, чем индуктивность круглых ТПЖ на 11–13 %.

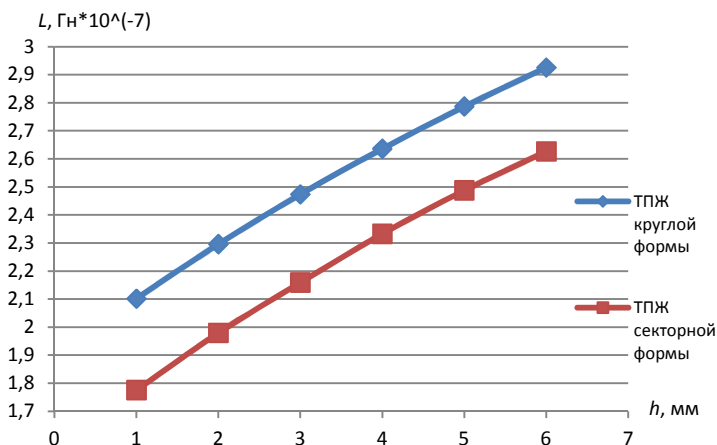


Рис. 4. Зависимость индуктивности ТПЖ от толщины изоляции

Результаты вычислений, представленные в данной работе, могут использоваться эксплуатирующими организациями.

Библиографический список

1. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: справочная книга. – 3-е изд. – Л.: Ленингр. отд-ние, 1986. – 179 с.

2. Соловейчик Ю.Г., Рояк М.Э., Персова М.Г. Метод конечных элементов для решения скалярных и векторных задач: учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – 895 с.

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.

И.А. Каменских, А.И. Судаков

НОВЫЙ ПОДХОД К ИССЛЕДОВАНИЮ И ИДЕНТИФИКАЦИИ ПЕРЕХОДНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ В ЗАШУМЛЁННЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССАХ СИНХРОННЫХ МАШИН

Основная трудоёмкость при идентификации переходных процессов синхронных машин связана с идентификацией переходной составляющей, которая присутствует от начала и до окончания процессов. Существенное снижение трудоёмкости исследований идентификации переходной составляющей решено за счёт снижения объёма выборки случайного признака с учётом ядра эффективных точечных выборок в области нижней границы диапазона её исследования, а также благодаря минимизации объёма эффективных точечных выборок по ядру с оценкой уровня достоверности по распределению Пуассона с целью конструирования комбинаторных выражений для идентификации переходной составляющей.

Ключевые слова: синхронная машина, переходные процессы, идентификация, математическое ожидание, дисперсия, случайный признак; постоянная времени, среднеквадратичная погрешность приближения, вероятность.

I.A. Kamenskikh, A.I. Sudakov

ON THE CONSTRUCTION OF COMBINATORIAL EXPRESSIONS FOR THE IDENTIFICATION OF NOISY TRANSIENTS OF POWERFUL SYNCHRONOUS MACHINES

The main complexity in identifying the transients of synchronous machines is associated with the identification of the transition component, which is present from the beginning to the end of the processes. The considerable reduction in the laboriousness of the identification of the transient component has been solved by reducing the sample size of the random feature, taking into account the core of the effective point samples in the region of the lower boundary of its study range, and also by minimizing the volume of effective point sampling by the core with the Poisson distribution reliability estimate for the design of combinatorial expressions to identify the transition component.

Keywords: synchronous machine, transitional processes, identification, mathematical expectation, variance, random factor, the time constant, root-mean-square error of approximation, probability.

Разработанные на кафедре «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета теоретические основы вероятностно-статистических методов (ВСМ) исследования и идентификации переходных процессов (ПП)

синхронных машин (СМ) в объёме ключевых опытов, регламентируемых программой приёмочных испытаний по отечественным и международным стандартам, подробно представлены в работах [1–4]. Разработанные ВСМ обеспечивают в условиях влияния различных случайных факторов высокую точность и достоверность идентификации зашумлённых переходных процессов данных машин. Но с увеличением мощности СМ растёт длительность переходных процессов, соответственно возрастают объёмы первичной информации, а также трудоёмкость исследований и идентификации переходной составляющей, которая присутствует в асимметричных и симметричных процессах с самого начала и до их окончания.

Идентификация ПП СМ с использованием ВСМ осуществляется в 2 этапа. **На первом этапе** по данным завода-изготовителя вершинам с шагом 0,02 с с учётом начального сдвига первой вершины на время ΔT от начала ПП при внезапном симметричном коротком замыкании (ВКЗ) осуществляется аналитическое преобразование его к дискретному в виде элементов между обеими огибающими с частотой 100 Гц по выражениям (1), (2), которые полностью исключают многочисленные графоаналитические процедуры в стандартах на методы обработки ПП СМ. Элемент i_{o1} на первом шаге с учётом начального сдвига ΔT первой вершины рассчитывают по формуле:

$$\left. \begin{aligned} i_{o1} &= |\pm I_{m1} - (\pm i_{i1})| \text{ при } |\pm I_{m1}| > |\pm i_{i1}| \text{ или при } |\pm i_{i1}| > |\pm I_{m1}|, \\ i_{i1} &= |1,875(\pm I_{m2}) - 1,25(\pm I_{m4}) + 0,375(\pm I_{m6})|. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Элементы i_{oj} со второго шага рассчитываются по унифицированному выражению (2) для получения интерполяционных величин токов i_{ij} при изменении переменной со второго шага $j = \overline{2, K}$ до конца переходного процесса с шагом 0,01 с:

$$\left. \begin{aligned} i_{oj} &= |\pm i_{ij} - (\pm I_{mj})| \text{ при } |\pm i_{ij}| > |\pm I_{mj}| \text{ или при } |\pm I_{mj}| > |\pm i_{ij}|, \\ i_{ij} &= |0,375(\pm I_{m(j-1)}) + 0,75(\pm I_{m(j+1)}) - 0,125(\pm I_{m(j+3)})|. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Коэффициенты в (1) служат для интерполяции назад с целью получения интерполяционной величины против первой вершины, а в (2) для интерполяции вперёд с целью получения интерполяционных величин между вершинами для расчёта элементов тока между обеими

огибающими ПП с шагом 0,01 с. На этом же этапе аналитически по опытным данным ПП осуществляется разделение полного тока якоря известными методами на симметричный и асимметричный его токи, поэтому использования элементов теории вероятностей и математической статистики (ТВиМС) не требуется. Поскольку симметричный ток в ПП содержит переходную, сверхпереходную составляющие и установившееся значение тока якоря СМ, то разделение его на переходную (или симметричную) и сверхпереходную составляющие в полулогарифмических осях по отечественным стандартам вносит ещё в большей степени в сравнении с первым этапом погрешность субъективного характера, что ведёт к существенному разбросу результатов идентификации этих составляющих по зашумлённым опытным данным. Теоретический анализ и многолетние исследования ПП СМ позволили выйти на ВСМ идентификации неустановившихся зашумлённых процессов данных машин.

На втором этапе в дискретном виде полного тока якоря выбирается участок с одной переходной составляющей и установившимся значением тока якоря в обоснованных границах $t'_n - t'^{*}_b$ для её исследования и идентификации с использованием случайного признака в виде kj -ПВ по выражению (3), которая выведена на базе логарифмического декремента синусоидальных колебаний через натуральный логарифм отношения двух соседних амплитуд и принята **за базовый случайный признак** [1]:

$$\tau'_{kj} = \frac{t'_j - t'_k}{\ln \left| \frac{t'_{ok}}{t'_{oj}} \right|} = \frac{t'_b - t'_n}{\ln \left| \frac{t'_{o,n}}{t'_{o,e}} \right|}, \quad (3)$$

где k – переменная для задания нижней границы, $k = \overline{1, K}$; j – переменная для задания верхней границы, $j = \overline{k+1, K}$; K – максимальное количество элементов в исследуемом диапазоне ПП с переходной составляющей.

С точки зрения теории вероятностей такая ПВ является точечной выборкой объёмом $n = 2$, легко извлекаемой из K элементов в исследуемом диапазоне $t'_n - t'^{*}_b$ на участке ПП с переходной составляющей и позволяющей легко создавать с избыточностью совокупность

случайного признака с любым объёмом выборки n_b формируемым комбинаторным способом по выражению (4) с охватом всех элементов $K = (t'_b - t'_n) / \Delta t + 1$, с шагом $\Delta t = 0,01$ с:

$$n_b = \sum_{k=1}^K \sum_{j=k+1}^K \tau'_{kj} + \sum_{k=2}^K \sum_{j=k+1}^K \tau'_{kj} + \sum_{k=3}^K \sum_{j=k+1}^K \tau'_{kj} + \dots \quad (4)$$

Объём выборки случайного признака зависит от количества элементов K в исследуемом диапазоне ПП с переходной составляющей. Чем больше K , тем больше объём выборки n_b случайного признака. Далее определяют математическое ожидание (МО), дисперсию случайного признака данного объёма, выборку преобразуют в вариационный ряд для оценки зашумлённости случайного признака, коэффициента вариации для определения степени отклонения затухающего процесса от экспоненциального закона. Проверяется генеральная гипотеза о предполагаемом нормальном законе распределения случайного признака с использованием критерия Пирсона [4]. Подсчитывается полный объём эффективных точечных выборок (отклоняющихся на минимальную относительную погрешность от МО), с последующей его минимизацией с использованием распределения Пуассона с целью конструирования комбинаторных выражений для идентификации переходной составляющей [1]. Исследования по представленной программе связаны с использованием огромных массивов для получения удовлетворительных уровней МО с дисперсией для работоспособности критерия Пирсона, минимизации объёма ЭТВ с высокой вероятностью для конструирования комбинаторных выражений, обеспечивающих минимальный уровень погрешности приближения модели переходной составляющей к опытным данным ПП в диапазоне её исследования. В зависимости от мощности СМ объёмы случайного признака в вариационных рядах колеблются от нескольких тысяч до сотен и более, что связано с резким возрастанием трудоёмкости исследований.

В докладе предложен **эффективный новый подход** к исследованию и идентификации переходной составляющей, снижающий в десятки раз объём выборки её случайного признака с пониженной оценкой уровня шума и коэффициента вариации, обеспечивающих высокую точность и достоверность результатов идентификации. Повышенная точность результатов идентификации обеспечивается бла-

годаря **выявленному ядру ЭТВ** в районе нижней границы диапазона исследования переходной составляющей в зашумлённых ПП СМ.

Ниже представлены результаты апробации нового подхода по результатам стендовых испытаний синхронного турбодвигателя СТД-12,5-2, на 12,5 МВт. Длительность ПП в опыте ВКЗ при напряжении 5000 В, записанная светолучевым осциллографом, составила 1 с. Диапазон исследования ПП с переходной составляющей с шагом 0,01 с составил от 0,12 до 1,00 с. Сдвиг первой вершины $\Delta T = 0,0051$ с. Количество элементов $K = 89$.

Объём выборки случайного признака $n_b = 3916$, свойства которой составили $MO = 0,411923$ с, $\sigma = 0,0949$ с. Преобразование данной выборки к вариационному ряду дали размах случайного признака по его концам, равный $R = (\tau'_{kj})_{\max} - (\tau'_{kj})_{\min} = 1,83843$ с, коэффициент вариации составил $v = \sigma_b / \tilde{\tau}'_b \cdot 100 \% = 23 \%$. С такой информацией не срабатывает критерий Пирсона, и возникают трудности с нормализацией вариационного ряда с поиском необходимой дисперсии для срабатывания критерия Пирсона, а также возникают дополнительные трудности с выделением полного объёма ЭТВ в выборке. Только после снижения относительной погрешности отклонения случайного признака от МО в вариационном ряду до 5 % по его концам дисперсия снижается до уровня работоспособности критерия Пирсона. При этом обнаруживаются случайные признаки, отклоняющиеся от МО нормализованного вариационного ряда с наименьшей относительной погрешностью, которые в ВСМ выведены аналитически и названы ЭТВ [1]. Одновременно ЭТВ обнаруживаются в объёме случайного признака, сформированного из 6–7 сумм по выражению (4) с образованием ядра ЭТВ, МО которого $(\tau'_{эф})_я = 0,395714$ с практически совпадает с МО $\tilde{\tau}'_n = 0,399927$ с вариационного ряда с 5 % разбросом по его концам и с $\sigma = 0,04471$. Именно это обстоятельство открывает возможность к существенному снижению трудоёмкости исследований, связанных с идентификацией переходной составляющей в длительных зашумлённых ПП.

Таким образом, снижение трудоёмкости исследований сводится к получению непосредственно из нормализованной выборки 6–7 сумм по выражению (4) с усреднением ЭТВ по их минимизированному объёму с распределением Пуассона [1, 4] с высокой степенью вероятности.

Идентификация сверхпереходной и аperiodической составляющих ПП с определением параметров СМ, ударного тока и получением другой информации сохранена без изменений в разработанном ВСМ [1].

В презентации приведены результаты идентификации переходной составляющей в фазах А и В с учётом предложенного нового подхода с использованием разработанного ВСМ по [1–3] с соответствующими иллюстрациями и полученные по результатам стендовых испытаний параметры представленного синхронного турбодвигателя в опыте ВКЗ по всем фазам.

Библиографический список

1. Судаков А.И., Чабанов Е.А. Вероятностно-статистические методы исследования и идентификации переходных процессов мощных синхронных машин: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2017. – 295 с.
2. Судаков А.И., Чабанов Е.А., Шулаков Н.В. Модернизация вероятностно-статистических методов исследования переходных процессов мощных синхронных машин // Электротехника. – 2010. – № 6. – С. 20–26.
3. Судаков А.И., Чабанов Е.А., Шулаков Н.В. Вероятностно-статистические методы исследования переходных процессов мощных синхронных машин // Электротехника. – 2010. – № 8. – С. 22–29.
4. Судаков А.И., Чабанов Е.А. Надёжность электрических машин: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2009. – 332 с.

Сведения об авторах

Каменских Илья Александрович – магистрант кафедры «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: kamenskih.ilya@gmail.com.

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

Д.Ю. Корюкин, А.Г. Щербинин

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ СИЛОВЫХ
КАБЕЛЕЙ С ТОКОПРОВОДЯЩИМИ
ЖИЛАМИ СЕКТОРНОЙ ФОРМЫ**

В данной статье рассмотрено математическое моделирование электромагнитных процессов силовых кабелей с токопроводящими жилами секторной формы. Объектом исследования являются круглые и секторные жилы сечением 240 мм^2 . Цель исследования – определение сопротивления токопроводящих жил силовых кабелей переменному току с учетом влияния поверхностного эффекта и эффекта близости. В работе получено распределение плотности тока в рассматриваемых жилах и приведены результаты расчетов сопротивлений по методу описанному в ГОСТ Р МЭК, аналитическим способом, а также с использованием программного пакета моделирования ANSYS Maxwell.

Ключевые слова: сопротивление, плотность тока, поверхностный эффект, эффект близости, токопроводящая жила.

D.Yu. Koryukin, A.G. Shcherbinin

**MATHEMATICAL MODELING OF ELECTROMAGNETIC
PROCESSES OF POWER CABLES WITH CURRENT-CARRYING
SECTOR-SHAPED CONDUCTOR**

In this paper, mathematical modeling of electromagnetic processes of power cables with current-carrying sector-shaped conductor is considered. The objects of investigation are round and sector-shaped conductors with a cross section of 240 mm^2 . The purpose of the research is to calculate the losses in current-carrying conductors of power cables, taking into account the surface effect and the proximity effect. The current density distribution in the conductors is obtained and the results of resistivity calculations are presented using the method described in the "GOST R IEC", in an analytical way, and using the ANSYS Maxwell simulation software package.

Keywords: resistance, current density, surface effect, proximity effect, current-carrying conductor.

В кабельной технике для определения токовых нагрузок и расчета потерь в токопроводящих жилах используют ГОСТ Р МЭК 60287-1-1-2009. Однако методика, описанная в данном документе, не позволяет точно определить сопротивление переменному току жил секторной формы

и более сложных конструкций. Таким образом, разработка модели электромагнитных процессов в секторных жилах и соответствующей ей методики определения сопротивления проводников переменному току, а также исследование влияния конструктивных параметров токопроводящих жил на величину сопротивления является актуальной темой и представляют научный интерес.

Известно, что при переменном токе явления поверхностного эффекта и эффекта близости приводят к увеличению сопротивления. Особенно вклад этих факторов заметен для сечений токопроводящих жил 240 мм² и больше.



Рис. 1. Токопроводящие жилы круглой и секторной форм

Для определения сопротивления токопроводящих жил силовых кабелей с учетом поверхностного эффекта и эффекта близости необходимо решать магнитодинамическую задачу [1, 2].

Для решения поставленной задачи были сделаны следующие допущения: изменение магнитного поля происходит в поперечном сечении кабеля; токи смещения не учитываются; поскольку все величины изменяются по гармоническому закону, используется метод комплексных амплитуд. Исходя из принятых допущений, дифференциальные уравнения для комплексной амплитуды векторного магнитного потенциала A для проводящей и диэлектрической среды выглядят следующим образом:

– проводящая среда:

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

– диэлектрическая среда:

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

где A – магнитный потенциал (в двухмерной постановке направлен по координате z); μ_a – абсолютная магнитная проницаемость; σ – удельная электропроводность; J_s – плотность тока, определяемая законом Ома в дифференциальной форме, $J_s = -\sigma \nabla \varphi$, величина J_s в пределах одного проводника есть величина постоянная; J_e – вихревая плотность тока, $J_e = -i\omega\sigma A$; i – мнимая единица.

Уравнение (1) дополняется уравнением для заданной величины тока в проводнике:

$$I = \int_{S_C} J ds = \int_{S_C} (-i\omega\sigma A + J_s) ds, \quad (3)$$

где S_C – площадь поперечного сечения проводника; J – результирующая плотность тока.

Для реализации равенства нулю векторного магнитного потенциала на бесконечно удаленной границе используется граничное условие Робина. Представленная магнитодинамическая задача решалась методом конечных элементов в программном пакете ANSYS Maxwell [2, 3].

На рис. 2 и 3 показано распределение плотности тока в жилах круглой и секторной формы с сечением 240 мм².

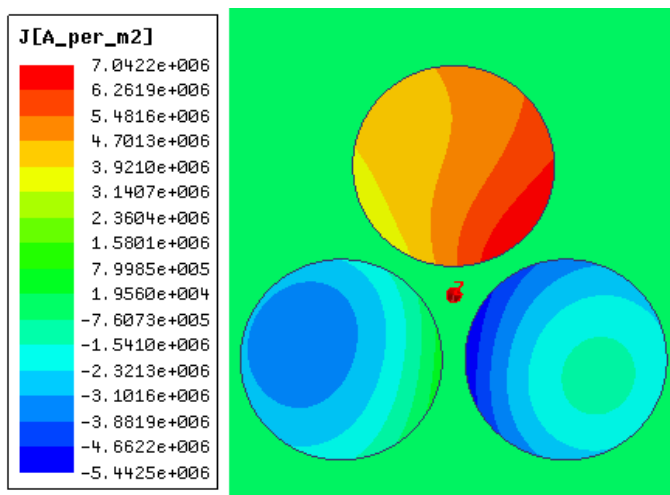


Рис. 2. Распределение плотности тока в круглой жиле с сечением 240 мм²

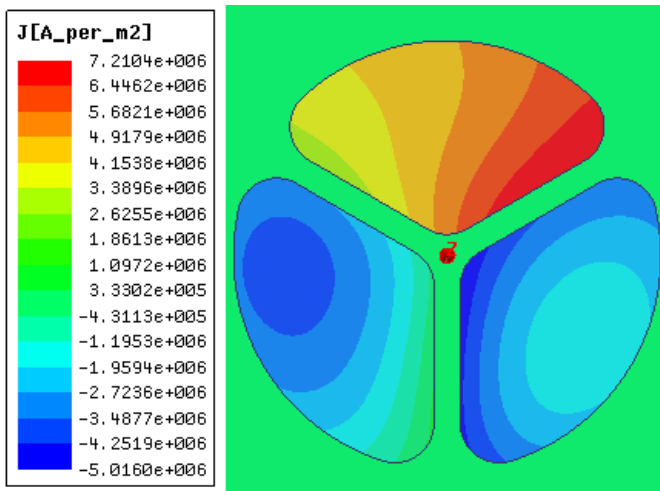


Рис. 3. Распределение плотности тока в секторной жиле с сечением 240 мм²

Исходя из полученных значений плотности тока, сопротивление жилы переменному току определяется по формуле:

$$R = \frac{1}{l^2} \int_S \rho_c \cdot j^2 dS, \quad (4)$$

где I – заданный ток; S – площадь поперечного сечения проводника; ρ_c – удельное электрическое сопротивление жилы; j – плотность тока.

Сопротивление ТПЖ переменному току превышает сопротивление ТПЖ постоянному току, в связи с тем, что в первом случае в проводнике возникают поверхностный эффект и эффект близости.

Отношение $\frac{R}{R'}$, где R' – сопротивление постоянному току, представляет собой сумму коэффициентов поверхностного эффекта, эффекта близости и единицы, тем самым показывает вклад указанных явлений в увеличение сопротивления проводника:

$$\frac{R}{R'} = 1 + K_{пэ} + K_{эб} \quad (5)$$

Результаты расчетов сопротивления переменному току и коэффициента поверхностного эффекта для круглых одножильных алюминиевой и медной конструкций тремя различными способами практически совпадают. Расхождение полученных результатов при решении каждым из методов не превышает 0,14 %.

Проведено исследование сопротивления алюминиевых жил переменному току силовых кабелей круглой и секторной формы в зависимости от толщины изоляции, в результате которого рассчитана оценка вклада поверхностного эффекта и эффекта близости. На рис. 4 видно, что в круглой ТПЖ доля поверхностного эффекта составляет около 0,014, а значение эффекта близости изменяется от 0,05 до 0,02 при решении по ГОСТ Р МЭК и от 0,06 до 0,03 при использовании ANSYS Maxwell. В секторной жиле $K_{пз} = 0,017$, а $K_{эб}$ снижается с 0,07 до 0,03.

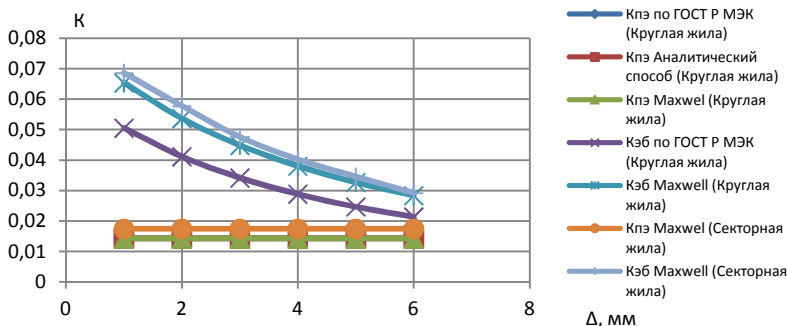


Рис. 4. Зависимость коэффициентов поверхностного эффекта и эффекта близости от толщины изоляции

На рис. 5 показано отношение сопротивлений переменному и постоянному току в зависимости от толщины изоляции для алюминиевого и медного проводников.

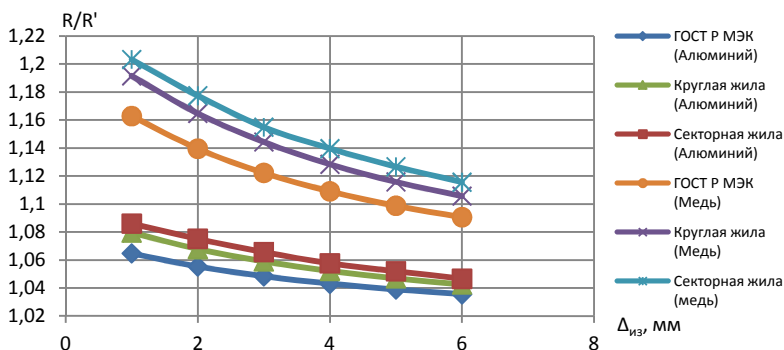


Рис. 5. Зависимость отношения сопротивлений переменному и постоянному току от толщины изоляции для различных материалов

Влияние поверхностного эффекта и эффекта близости на медную жилу больше из-за лучших проводящих характеристик материала.

Таким образом, можно заметить, что рост сопротивления токопроводящих жил переменному току связан с наличием поверхностного эффекта и эффекта близости. Разработанная математическая модель позволяет определять сопротивление проводников секторной формы с учетом вышеперечисленных явлений. Графики показывают отличие значений для круглых и секторных жил. Недостаток ГОСТ Р МЭК заключается в том, что описанный в нем метод определения сопротивления переменному току сориентирован в основном на расчет сопротивления круглых ТПЖ.

Библиографический список

1. Григорьев А.Д. Методы вычислительной электродинамики. – М.: Физматлит, 2012. – 430 с.
2. Соловейчик Ю.Г., Рояк М.Э., Персова М.Г. Метод конечных элементов для решения скалярных и векторных задач: учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – 895 с.
3. Бате К.Ю. Методы конечных элементов. – М.: Физматлит, 2010. – 1022 с.

Сведения об авторах

Корюкин Денис Юрьевич – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. МЭ-13-16, г. Пермь, e-mail: koryukin-95@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.

Е.И. Лекомцев

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСЕСИММЕТРИЧНОГО ТЕЧЕНИЯ В КАБЕЛЬНОЙ ГОЛОВКЕ

В данной статье смоделировано осесимметричное стратифицированное течение расплавов полимеров в кабельной головке (Maillefer THX 35-75). Произведён подбор законов течения полимерных материалов с помощью программного пакета ANSYS Polymat. Подобраны технологические параметры процесса.

Ключевые слова: стратифицированное течение, осесимметричная постановка, закон Carreau-Yasuda, степенной закон, свободная поверхность.

E.I. Lekomcev

INVESTIGATION OF AXISYMMETRIC FLOW IN THE CABLE DIES

In this article the axisymmetric stratified flow of polymer melts in the cable die (Maillefer THX 35-75) have been simulated. Selection of polymeric materials flow laws by means of the software ANSYS Polymat have been made. Technological parameters of process have been picked up.

Keywords: stratified flow, axisymmetric formulation, Carreau-Yasuda law, Power law, free surface.

Математическая постановка задачи. На рис. 1 представлена геометрия кабельной головки фирмы Maillefer, которая позволяет одновременно накладывать три слоя полимерной изоляции (полупроводящий экран по токопроводящей жиле, изоляция, полупроводящий экран по изоляции). Для упрощения модели и технической реализации исследования был сделан ряд допущений:

- процесс стационарный;
- теплофизические характеристики постоянны;
- течение осесимметричное;
- массовые силы значительно меньше поверхностных;
- на границах канала реализуются условия прилипания и непроницаемости.

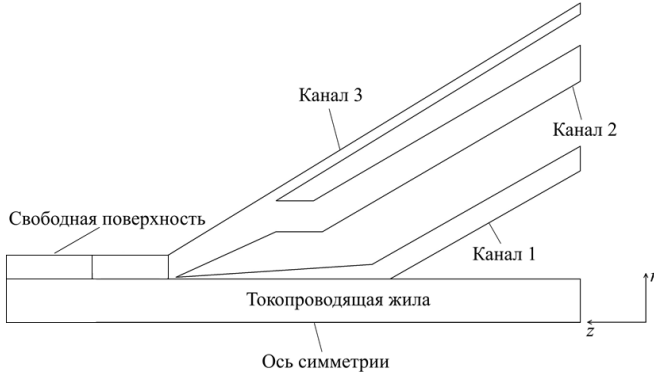


Рис. 1. Геометрия кабельной головки Maillefer THX 35-75

С учетом данных допущений система дифференциальных уравнений примет вид:

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial r} \left(2\mu_3^i \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) + \frac{2\mu_3^i}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{2}{r^2} \mu_3^i v_r + \\ + \frac{\partial}{\partial r} \left[\mu_3^i \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \right] = \frac{\partial P}{\partial r}; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial r} \left[\mu_3^i \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \right] + \frac{\mu_3^i}{r} \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left(2\mu_3^i \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = \frac{\partial P}{\partial z}; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\rho^i C^i \left(v_r \frac{\partial T}{\partial r} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda^i \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda^i \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v, \quad (4)$$

где $\mu_3^{1,3} = \mu_0 e^{-\beta(T-T_0)} \dot{\gamma}^{n-1}$;

$$\mu_3^2 = \left(\mu_\infty + (\mu_0 - \mu_\infty) [1 + \lambda_p \dot{\gamma}^a]^{n-1} \right) e^{-\beta(T-T_0)}. \quad (5)$$

Уравнения (1)–(5) замыкаются граничными условиями:

– на неподвижных стенках канала компоненты скорости равны нулю;

– на границе контакта с ТПЖ компонента скорости равна скорости ТПЖ;

– на входе в каналы задавались массовые расходы материалов;

– на выходе из каналов задавались ГУ второго рода по скорости и температуре;

– $T_{\text{стенок}} = 443 \text{ K}$ ($170 \text{ }^{\circ}\text{C}$);

– $T_{\text{расплавов}} = 423 \text{ K}$ ($150 \text{ }^{\circ}\text{C}$);

– $T_{\text{жилы}} = 383 \text{ K}$ ($110 \text{ }^{\circ}\text{C}$);

– на свободной поверхности: $\bar{v}\bar{n} = 0$, $\bar{\sigma}\bar{n} = 0$, $\bar{\sigma}\bar{t} = 0$ [1];

– на границах раздела потоков:

– по скоростям

$$v_r|_1 = v_r|_2; \quad v_r|_2 = v_r|_3; \quad v_z|_1 = v_z|_2; \quad v_z|_2 = v_z|_3; \quad (6)$$

– по напряжениям

$$\begin{aligned} (\tau_{rr} \cos(r, n) + \tau_{rz} \cos(z, n))|_1 &= (\tau_{rr} \cos(r, n) + \tau_{rz} \cos(z, n))|_2; \\ (\tau_{rr} \cos(r, n) + \tau_{rz} \cos(z, n))|_2 &= (\tau_{rr} \cos(r, n) + \tau_{rz} \cos(z, n))|_3; \\ (\tau_{rr} \cos(z, n) + \tau_{rz} \cos(r, n))|_1 &= (\tau_{rr} \cos(z, n) + \tau_{rz} \cos(r, n))|_2; \\ (\tau_{rr} \cos(z, n) + \tau_{rz} \cos(r, n))|_2 &= (\tau_{rr} \cos(z, n) + \tau_{rz} \cos(r, n))|_3; \end{aligned} \quad (7)$$

– по потокам тепла

$$q_r|_1 = q_r|_2; \quad q_r|_2 = q_r|_3; \quad q_z|_1 = q_z|_2; \quad q_z|_2 = q_z|_3; \quad (8)$$

– по температуре

$$T|_1 = T|_2; \quad T|_2 = T|_3; \quad (9)$$

$$\tau_{rr} = 2\mu_3 \frac{\partial v_r}{\partial r}, \quad \tau_{rz} = \mu_3 \left(\frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) [2]. \quad (10)$$

В табл. 1 приведены теплофизические характеристики полимерных материалов, в табл. 2 – технологические параметры [3].

Таблица 1

Теплофизические характеристики материалов

Материал	Плотность ρ , кг/м ³	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м · К)	Удельная теплоемкость C , Дж/(кг · К)
273-81К	960	0,2	2300
ЭПК-35	1100	0,25	1750

Таблица 2

Технологические параметры

Номер слоя	Расход материала, Q, кг/с	Номинальные толщины слоев, мм	Линейная скорость движения жилы, м/с
1	0,017	0,6	0,4
2	0,085	3,2	
3	0,04	1,1	

Существует ряд законов, которые описывают кривые вязкости и реологические кривые. Используя лабораторные данные и программный пакет ANSYS Polymat, проведен подбор законов течения, которые наилучшим образом описывают течение материалов. Для 273-81K – закон Carreau–Yasuda (рис. 2), ЭПК-35 – степенной закон (рис. 3).

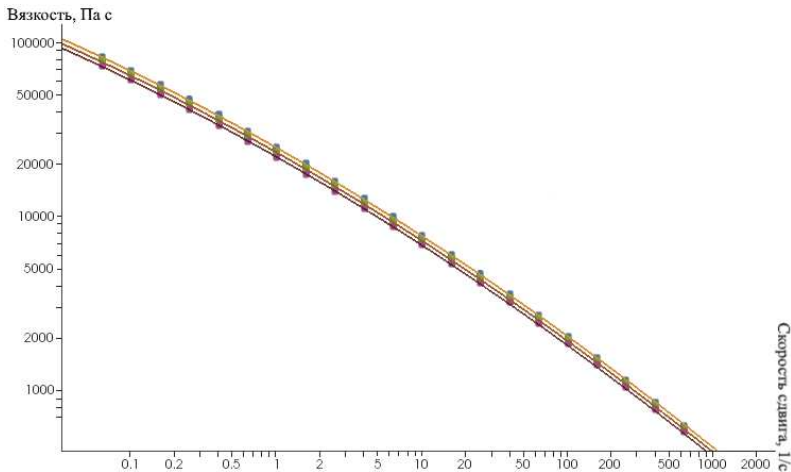


Рис. 2. Описание экспериментальных кривых материала 273-81K

Полученные данные были интегрированы в ANSYS Polyflow, где производилась численная реализация поставленной задачи. На рис. 4 представлена форма выходного экструдата [4].

Правильный подбор технологических параметров (см. табл. 2) позволил получить номинальные толщины слоев: экран по жиле – 0,6 мм; изоляция – 3,2 мм; экран по изоляции – 1,1 мм.

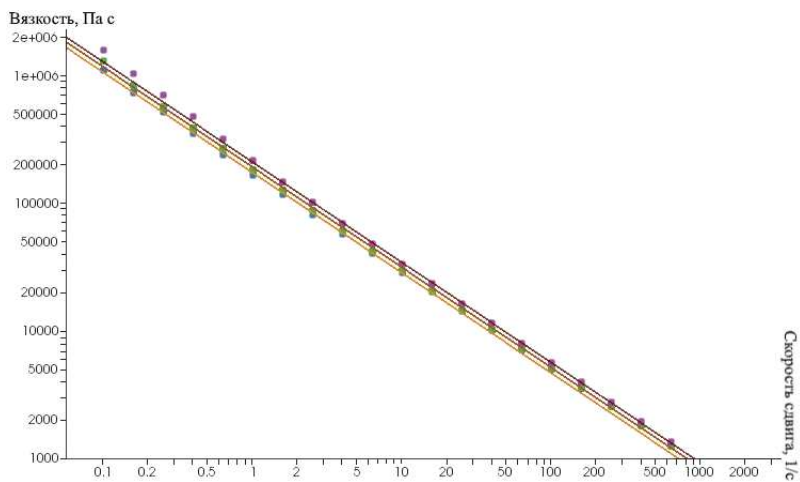


Рис. 3. Описание экспериментальных кривых материала ЭПК-35

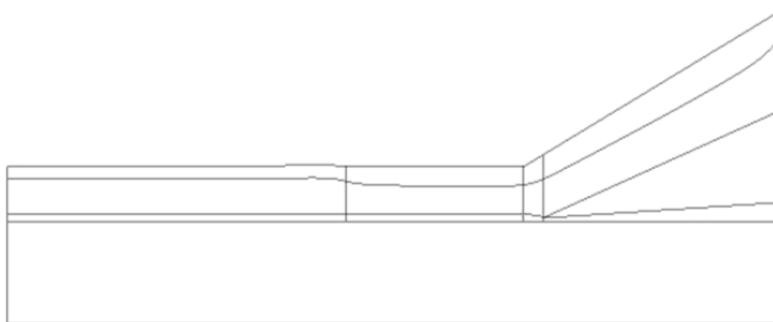


Рис. 4. Распределение потоков и форма выходного экструдата

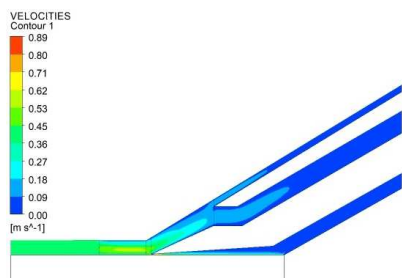


Рис. 5. Поле скоростей

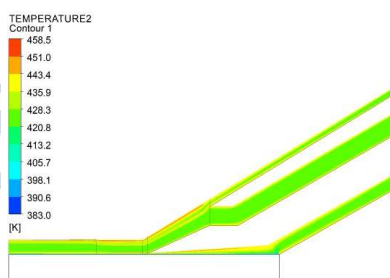


Рис. 6. Температурное поле

На рис. 5 изображено поле скоростей. Максимальная скорость достигается в самом узком участке геометрии (канал 1) и составляет 0,89 м/с. Это на 0,49 м/с больше, чем линейная скорость движения токопроводящей жилы.

Анализ температурного поля (рис. 6) показал равномерный характер прогрева материалов. Максимальная температура составляет 458,5 К. Локальный перегрев материалов обусловлен наличием диссипативных источников тепла. Средняя температура выходной струи составила 425 К.

Библиографический список

1. Юрыгин П.П. Исследование стратифицированного течения резиновых смесей в дуплексных головках для выпуска заготовок кольцевого: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ярослав. гос. техн. ун-т. – Ярославль, 2014.

2. Казаков А.В., Труфанова Н.М. Численные исследования режимов стратифицированного течения и методика управления процессом экструзионного наложения многослойной изоляции // Известия Томск. политехн. ун-та. – 2012. – Т. 320, № 4. – С. 167–171.

3. Kozitsyna M.V., Trufanova N.M. The numerical study of the influence of rheological parameters stratified flows characteristics in cable dies // Journal of Physics: Conference Series. – 2017.

4. Снегирев Б.А., Алиев К.М., Тазюков Ф.Х. О форме выходящей струи при выдавливании вязкоупругой жидкости из плоского щелевого канала // Вестник Самар. гос. ун-та. Естественно-научная серия. – 2009. – № 6(72).

Сведения об авторе

Лекомцев Евгений Игоревич – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КТЭ-16-1м, г. Пермь, e-mail: yevgen_lekomcev@rambler.ru.

А.В. Ляхомский, С.В. Петухов, Д.О. Шаров

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ГОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

В данной статье рассмотрена способность искусственных нейронных сетей прогнозировать электропотребление горного оборудования, приведены методика разработки и обучения прогнозирующей искусственной нейронной сети, анализ результатов кросс-проверки спрогнозированного электропотребления.

Ключевые слова: искусственная нейронная сеть, прогнозирование электропотребления.

A.V. Lyakhomsky, S.V. Petukhov, D.O. Sharov

PREDICTING ELECTRIC CONSUMPTION OF MINING EQUIPMENT USING ANN

This article considers the ability of artificial neural networks to predict the power consumption of mining equipment, provides a methodology for developing and training a predictive artificial neural network, an analysis of the results of a cross-check of the predicted power consumption.

Keywords: artificial neural network, predicting power consumption.

Одной из задач энергетического менеджмента является информационно-аналитическое обеспечение повышения энергоэффективности с учетом «человеко-машинного» характера процесса потребления энергоресурсов для принятия персоналом управляющих решений, ориентированных на достижение наилучшего результата.

Особо важную роль в принятии таких решений играет прогнозирование электропотребления (ЭП), автоматизированное исполнение которого реализовано в виде программно-аналитических комплексов (ПАК), использующих традиционные методы обработки информации (корреляционно-регрессионные, факторные и др.). ПАК способны производить прогноз ЭП в режиме реального времени, а также осуществлять контроль текущих показателей энергоэффективности с последующим сравнением их с спрогнозированными, что в совокупности с мотивационной работой может привести к снижению объема затрачиваемых энергоресурсов на единицу выпускаемой продукции.

Вместе с этим повышение качества информационно-аналитического обеспечения требует поиска более совершенных методов обработки информации, в том числе методов искусственных нейронных сетей (ИНС), преимущества которых позволяют улучшить качество обработки информации, повысить точность прогнозирования и, как следствие, усовершенствовать существующие программно-аналитические комплексы.

Планируемая ИНС для прогнозирования ЭП является математической моделью, построенной по принципу организации и функционирования биологических нейронных сетей [1], а также ее программным воплощением. ИНС способна организовывать свои структурные компоненты – нейроны таким образом, что задачи по прогнозированию могут решаться во много раз быстрее по сравнению с традиционными методами обработки информации (корреляционно-регрессионными, факторными и др.).

Применение указанных ИНС повышает уровень информационно-аналитического обеспечения эффективности функционирования электротехнических комплексов предприятий [2, 3].

Блок-схема нелинейного нейрона ИНС для прогнозирования ЭП, приведенная на рис. 1, описывается уравнениями:

$$u_k = \sum_{i=1}^m w_{ki} x_i, \quad (1)$$

$$y_k = \varphi(u_k + b_k), \quad (2)$$

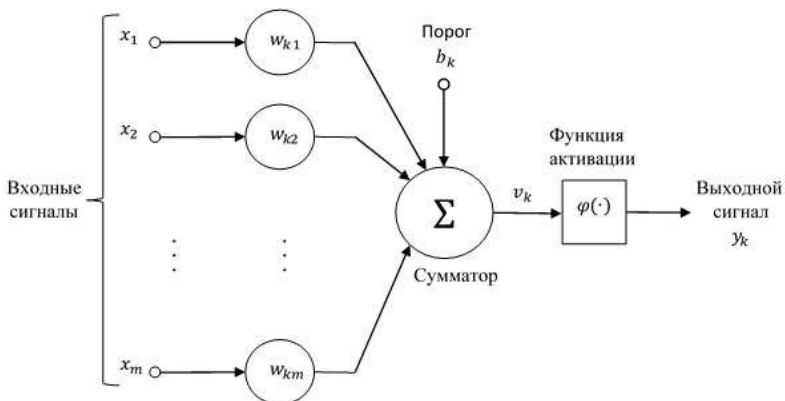


Рис. 1. Блок-схема нелинейной модели нейрона: $x_1, x_2, \dots, x_m$ – входные сигналы; $w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{km}$ – синаптические веса нейрона k ; u_k – линейная комбинация входных воздействий; b_k – порог; $\varphi(\cdot)$ – функция активации; y_k – выходной сигнал нейрона

В представленной модели нелинейного нейрона можно выделить следующие элементы: набор синапсов, каждый из которых характеризуется своим весом w_{ki} ; сумматор Σ , производящий сложение входных сигналов x_i , взвешенных относительно синапсов, включая пороговый элемент b_k ; функция активации, ограничивающая амплитуду выходного сигнала [4].

Функция активации, представленная в формулах как $\varphi(\cdot)$, определяет выходной сигнал нейрона в зависимости от индуцированного локального поля, описываемого уравнением

$$v_k = u_k + b_k. \quad (3)$$

Из основных типов функций активации (пороговая, кусочно-линейная, сигмоидальная) была принята сигмоидальная как охватывающая наибольший спектр связей, задаваемых рабочей средой ИНС, и позволяющая определить как линейные, так и нелинейные зависимости.

Для решения задачи прогнозирования ЭП из двух основных типов нейросетевых архитектур (сети прямого распространения и рекуррентные сети) была принята ИНС прямого распространения, характеризующаяся передачей информации только в одном направлении от входного слоя к выходному как оптимальная в отношении точности прогноза и степени сложности ее обучения.

В результате синтеза ИНС и проведения проверок их прогнозирующих способностей была принята ИНС, наилучшим образом справляющаяся с прогнозом ЭП, структурная блок-схема, которой приведена на рис. 2.

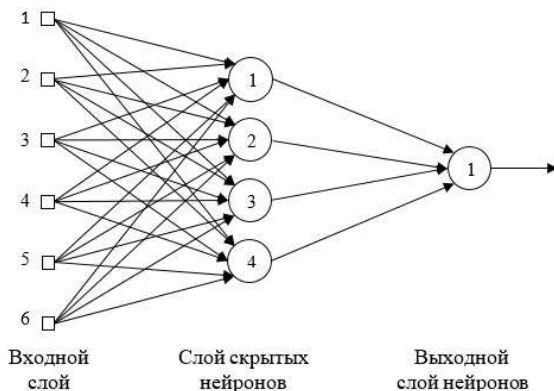


Рис. 2. Структурная блок-схема синтезированной прогнозирующей ИНС

Указанная ИНС имеет входной слой, состоящий из 6 узлов источника сигналов, 1 слой скрытых нейронов, заключающий в себе 4 нейрона, обладающих синусоидальной функцией активации, и выходной слой, имеющий 1 нейрон с тождественной функцией активации.

Для обучения принятой ИНС применена парадигма обучения с учителем, выполненная по BFGS алгоритму на основе сменных данных (2 смены) о ЭП и объеме выполненной работы (ОР) сортировочно-грохотильной машины МСГ-2000. Обучение производилось на основе 350 обучающих и 75 тестовых подвыборок, еще 75 подвыборок были использованы для проведения кросс-проверки, прогнозирующей способности ИНС.

Обучение прогнозирующей ИНС происходит по итерационному методу [5]. Для этого берется обучающая подвыборка, из которой на входы ИНС (см. рис. 2) подаются данные о ЭП, ОР и смене за 2 предыдущих временных шага $t - 1$ и $t - 2$ (что и определяет 6 входных узлов прогнозирующей ИНС), на выход же подается значение ЭП за текущий временной шаг t . Затем происходит настройка свободных параметров ИНС на первом шаге итерации таким образом, чтобы входным данным соответствовало выходное значение прогнозируемого ЭП. Последующие шаги итерации проводятся до тех пор, пока ошибка между прогнозом ЭП и его фактическим значением уменьшается. Если все обучающие подвыборки прошли процесс настройки свободных параметров ИНС, а обучение ИНС еще не закончилось, то последовательность обучающих подвыборок меняется случайным образом и процесс обучения ИНС продолжается. Таким образом, происходит подготовка ИНС к прогнозированию ЭП.

Для проверки качества исходных данных о ЭП и ОР был проведен их статистический анализ, характеристики которого приведены в табл. 1.

Таблица 1

Статистические показатели исходных данных о ОР и ЭП

Статистические показатели	ОР	ЭП
Среднее	$\bar{V} = 2567,8, \text{т}$	$\bar{W} = 1240,5, \text{кВт} \cdot \text{ч}$
Медиана	$M_d = 2549,6, \text{т}$	$M_d = 1243,7, \text{кВт} \cdot \text{ч}$
Мода	$M_d = 2350, \text{т}$	$M_d = 1250, \text{кВт} \cdot \text{ч}$
Среднеквадратическое отклонение	$\sigma_V = 570,2, \text{т}$	$\sigma_W = 237,9, \text{кВт} \cdot \text{ч}$
Коэффициент вариации	$V_{\sigma V} = 22,2 \%$	$V_{\sigma W} = 19,2 \%$
Коэффициент корреляции	$r_{WV} = 0,83$	

Анализ данных табл. 1 показывает, что значения среднего, моды и медианы ЭП и ОР близки между собой, коэффициент вариации также не превышает 33 %, поэтому можно предположить существование нормального закона распределения ЭП и ОР, что говорит о достаточном качестве исходных данных для дальнейшего применения их в прогнозировании.

Высокое значение коэффициента корреляции между ЭП и ОР, равное $r_{WV} = 0,83$, подтверждает наличие сильной связи между этими двумя показателями и позволяет предположить, что обучение ИНС с достаточной точностью определит функцию зависимости ЭП от ОР и, как следствие, возможно, совершать качественный прогноз ЭП. Для синтезированной и обученной ИНС была проведена кросс-проверка ее прогнозирующих способностей на основе контрольной выборки.

На первом этапе оценки точности прогнозирования ЭП посредством ИНС был осуществлен сравнительный анализ линейных графиков фактического и спрогнозированного ЭП, отображенных на рис. 3.

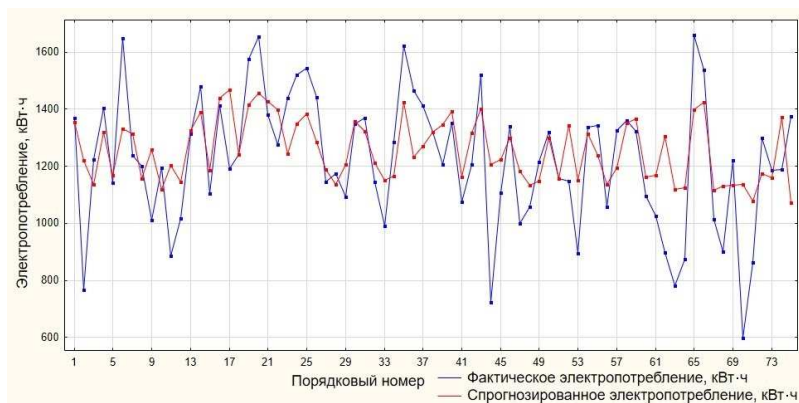


Рис. 3. Линейный график фактического и спрогнозированного ЭП

Из анализа графиков можно заключить, что ИНС достаточно хорошо справляется с прогнозом ЭП, повторяет основные тенденции фактического ЭП, но при этом заметим, что она допускает большие по величине ошибки (промахи) в единичных случаях, что негативно сказывается на качестве прогноза. В результате проведения кросс-проверки определены показатели качества прогноза, приведенные в табл. 2.

Таблица 2

Показатели качества прогноза электропотребления

Показатели качества прогноза	Значение показателей
Коэффициент корреляции	$r_{x_t \hat{x}_t} = 0,66$
Средняя абсолютная ошибка	MAE = 139,6 кВт · ч
Средняя относительная ошибка	MAPE = 13,2 %

На основании полученных данных можно заключить, что прогнозная модель, разработанная на базе ИНС, обладает приемлемой точностью, поэтому может являться дальнейшим объектом исследования для улучшения точности прогноза.

Библиографический список

1. Искусственная нейронная сеть. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Искусственная_нейронная_сеть
2. Некоторые аспекты технологии эксплуатации электротехнических объектов на основе методов краткосрочного прогнозирования технического состояния / В.П. Казанцев, А.Б. Петроченков, А.В. Ромодин, Н.И. Хорошев // Электротехника. – 2011. – № 11. – С. 28–34.
3. Petrochenkov A.B. Management of effective maintenance of the electrotechnical complexes of mineral resource industry's enterprises based on energy-information model // IEEE Conference Publications. Proceedings of International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2015. – 2015. – P. 122–124. DOI: 10.1109/SCM.2015.7190430
4. Хайкин Саймон. Нейронные сети: полный курс: пер. с англ. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2017. – 1104 с.
5. Круг П.Г. Нейронные сети и нейрокомпьютеры: учеб. пособие по курсу «Микропроцессоры». – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 176 с.

Сведения об авторах

Ляхомский Александр Валентинович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Энергетика и энергоэффективность горной промышленности» Национального исследовательского технологического университета «МИСиС», горного института, г. Москва, e-mail: mggu.eegp@mail.ru.

Петухов Степан Викторович – главный энергетик Сибирской угольной энергетической компании, г. Москва.

Шаров Дмитрий Олегович – студент Национального исследовательского технологического университета «МИСиС», горного института, гр. УЭР-14, г. Москва, e-mail: sharov_dima.ru@mail.ru.

А.А. Пашихина, В.В. Черняев

РАСЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ИЗГОТОВЛЕНИЯ КАБЕЛЯ ВВГЭнг(А)-LS-0,66кВ

В данной статье были рассмотрены технологический режим изготовления кабеля ВВГЭнг(А)-LS, а также методика расчета операции изолирования токопроводящих жил. Выбраны параметры технологического оборудования и инструмента.

Ключевые слова: кабель, изолирование жилы, технологический режим, параметры технологического оборудования.

A.A. Pashikhina, V.V. Chernyaev

CALCULATION OF TECHNOLOGICAL MODE OF CABLE PRODUCTION VVGEng(A)-LS-0,66kV

This article was reviewed by the technological mode of manufacture of the cable VVGEng(A)-LS. The techniques of calculation operations are isolation conductors. Selected parameters of technological equipment and tools.

Keywords: Cable, isolation conductors, technological mode, parameters of technological equipment.

Статистические данные о пожарах, произошедших при эксплуатации электрооборудования и электроустановок в России, свидетельствуют о том, что 60 % из них приходится на кабельные изделия [1]. Главная причина такого положения в том, что кабельные коммуникации имеют значительную протяженность и высокую концентрацию горючих изоляционных материалов, что существенно повышает риск возникновения аварийных режимов работы, приводящих к пожару. А, значит, расчет технологического режима изготовления не распространяющих горение кабелей является актуальной задачей.

Рассмотрим типовую конструкцию такого кабеля на примере силового кабеля марки ВВГЭнг(А)-LS [2] на напряжение 0,66 кВ (рис. 1).

Кабели предназначены для передачи и распределения электрической энергии в стационарных электротехнических установках, где требуется высокий уровень электрической и механической защиты, на номинальное переменное напряжение до 0,66 кВ номинальной

частотой 50 Гц. Кабели предназначены для одиночной и групповой прокладки в производственных помещениях. Диапазон температур эксплуатации – от –50 до +50 °С.

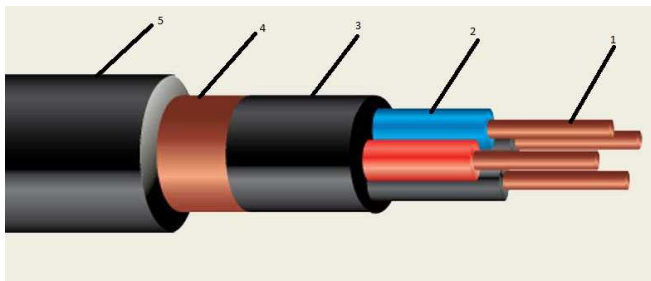


Рис. 1. Силовой кабель марки ВВГЭнг(А)-LS: 1 – токопроводящая гибкая медная круглая жила; 2 – изоляция из ПВХ пластиката пониженной пожароопасности; 3 – внутренняя оболочка из поливинилхлоридной композиции пониженной пожароопасности; 4 – экран из медной ленты; 5 – внешняя оболочка из поливинилхлоридной композиции пониженной пожароопасности

В работе рассмотрен расчет технологического режима наложения поливинилхлоридной изоляции на экструзионной линии RN-A для четырех маркоразмеров. Результаты расчетов сведены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные для расчета технологического
режима изолирования

Марко-размер	Диаметр жилы, мм	Толщина изоляции, мм	Диаметр изолированной ТПЖ, мм
2×1,5	1,35	0,55	2,5
2×2,5	1,73	0,55	2,8
3×1,5	1,35	0,55	2,5
3×2,5	1,73	0,55	2,8

Расчет параметров технологического режима начнем с определения размеров и геометрии формирующего инструмента.

Внутренний диаметр дорна определяется по формуле: $d_d = d_{\text{ТПЖ}} + 0,2$, где $d_{\text{ТПЖ}}$ – диаметр токопроводящей жилы, мм. Для сечения 2,5 мм² диаметр дорна составит: $d_d = d_{\text{ТПЖ}} + 0,2 = 1,73 + 0,2 = 1,93$ мм.

Внутренний диаметр носика дорна:

$$D_{\text{нос. дорн}} = d_d + 2 \text{ мм} = 1,93 + 2 = 3,93 \text{ мм.}$$

Диаметр цилиндрической части матрицы: $D_M = D_{\text{нос. дорн}} + 2\Delta_{\text{из}}$,
где $\Delta_{\text{из}}$ – толщина изоляции, мм.

$$D_M = 3,93 + 2 \cdot 0,55 = 5,03 \text{ мм.}$$

Длина цилиндрической части матрицы принимается:

$$L_M = (4 \dots 6) \Delta_{\text{из}} = 6 \cdot 0,55 = 3,3 \text{ мм.}$$

Длина цилиндрической части (носика) дорна:

$$L_d = L_M + 3 = 3,3 + 3 = 6,3 \text{ мм.}$$

$\alpha = 60^\circ$ – угол конусной поверхности дорна;

$\beta = 65^\circ$ – угол конусной поверхности матрицы.

Параметры технологического инструмента для остальных марко-размеров рассчитываются аналогично. Результат представлен в табл. 2.

Таблица 2

Размеры формирующего инструмента для наложения изоляции

Марко-размер	d_d , мм	D_M , мм	L_M , мм	L_d , мм	α , °	β , °	$D_{\text{нос. дорн}}$
2×1,5	1,55	4,65	3,3	6,3	60	65	3,55
2×2,5	1,93	5,03	3,3	6,3	60	65	3,93
3×1,5	1,55	4,65	3,3	6,3	60	65	3,55
3×2,5	1,93	5,03	3,3	6,3	60	65	3,93

Следующим шагом выполним расчет линейной скорости наложения изоляции, которая будет определяться выражением: $V_d = k \cdot Q/P$, где Q – производительность экструдера, кг/мин; P – расход материала на единицу длины изделия, кг/м; k – коэффициент запаса. Тогда

$$V_d = 0,7 \cdot \frac{9,333}{0,0135} = 483,93 \text{ м/мин.}$$

Поскольку расчетная скорость линии оказалась больше максимальной паспортной линейной скорости (300 м/мин), принимаем фактическую скорость изолирования равной 300 м/мин.

Расчет длины охлаждающей ванны выполним с учетом температуры воды и изоляции, представленных в табл. 3.

Таблица 3

Температура воды в охлаждающей ванне и изоляции

Температура, °С		
Воды	Изоляции на входе в ванну	Изоляции на выходе из ванны
20	185	50

Коэффициент теплоотдачи применительно к воде:

$$\alpha = 1,163C \left(\frac{T}{D} \right)^{1/4},$$

где D – диаметр по изоляции, м; C – коэффициент, зависящий от средней температуры слоя; T – средний перепад температур, зависящий от t_0 – средней температуры изоляции:

$$t_0 = \frac{t_{\text{нач}} + t_{\text{кон}}}{2}, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Здесь $t_{\text{нач}}$ – температура изоляции на входе в ванну, $^\circ\text{C}$; $t_{\text{кон}}$ – температура изоляции на выходе из ванны, $^\circ\text{C}$;

$$t_0 = \frac{185 + 50}{2} = 117,5 \text{ } ^\circ\text{C}; T = (t_0 - t_{\text{кон}}) = (117,5 - 50) = 67,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Средняя температура слоя изоляции вычисляется по формуле [3, 4]:

$$t_c = t_0 - 0,5T = 117,5 - 0,5 \cdot 67,5 = 83,75 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Тогда $C = 170$. Коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = 1,163 \cdot 170 \left(\frac{67,5}{2,8 \cdot 10^{-3}} \right)^{1/4} = 2463,571 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}.$$

Зная коэффициент теплоотдачи, определим длину ванны охлаждения по формуле [3, 4]:

$$l = \frac{(C_{\text{ж}} \cdot Q_{\text{ж}} + C_{\text{из}} \cdot Q_{\text{из}}) \cdot \vartheta (t_{\text{нач}} - t_{\text{в}})}{\alpha \cdot \pi \cdot D (t_0 - t_{\text{в}})},$$

где $C_{\text{ж}}$, $C_{\text{из}}$ – удельная теплоемкость жилы и изоляции соответственно, Дж/кг $^\circ\text{C}$; $Q_{\text{ж}}$, $Q_{\text{из}}$ – расход материала жилы и изоляции соответственно, кг/м; ϑ – скорость наложения изоляции, м/с; Тогда

$$l = \frac{(385 \cdot 42,7 + 1340 \cdot 13,5) 10^{-3} \cdot 300 / 60 (185 - 50)}{2463,571 \cdot 3,14 \cdot 2,8 \cdot 10^{-3} (117,5 - 50)} = 9,628 \text{ м}.$$

Расчетные длины ванны для остальных маркоразмеров представлены в табл. 4.

Таблица 4

Длина охлаждающей ванны

Маркоразмер	Общая длина ванны, м
2×1,5	6,946
2×2,5	9,628
3×1,5	6,946
3×2,5	9,628

Для наложения изоляции принимаем длину ванны, равную 10 м.

В результате выполненных расчетов был получен технологический режим изготовления кабеля марки ВВГЭнг(А)-LS. Выбраны требуемые параметры технологического оборудования, а также инструмента.

Библиографический список

1. Каменский М.К., Мещанов Г.И., Фрик А.А. Кабели и провода пожаробезопасного исполнения. Современное состояние и тенденции развития // Кабели и провода. – 2017. – № 3.
2. URL: <http://www.kamkabel.ru>
3. Ковригин Л.А. Основы кабельной техники: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2006. – 94 с.
4. Основы кабельной техники / под общ. ред. проф. В.А. Привезенцева. – М.: Энергия, 1967.

Сведения об авторах

Пашихина Алёна Алексеевна – студентка Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. МЭ-14-1б, г. Пермь, e-mail: jonni-alenka@bk.ru.

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

И.Ю. Передернин, А.Г. Щербинин

РЕЖИМ ОХЛАЖДЕНИЯ ПОЛИМЕРНОЙ ОБОЛОЧКИ

В работе представлен расчет режима охлаждения полимерной оболочки (изоляции) кабеля марки ВБШвнг(А) – 0,66 кВ с маркоразмерами 5×16, 5×25, 5×35, 5×50 мм. Для определения температурного поля в сечениях проводника и оболочки (изоляции) использовался язык программирования Паскаль ABC.

Ключевые слова: изоляция, температура на внутренней поверхности, охлаждающая ванна.

I.Yu. Peredernin, A.G. Shcherbinin

POLYMER SHELL COOLING MODE

The paper presents the calculation of the cooling of the polymer shell (insulation) cable brand VbSwng(A) – 0.66 kV with marco-size 5×16, 5×25, 5×35, 5×50. The programming language Pascal ABC was used to determine the temperature field in the cross sections of the conductor and the shell (insulation).

Keywords: insulation, temperature on the inner surface, cooling bath.

Одним из этапов технологического процесса наложения пластмассовой изоляции является процесс охлаждения изолированного провода в охлаждающей ванне. Этап охлаждения является одним из важнейших, поскольку качество полученной оболочки (изоляции) определяется правильно выбранным режимом охлаждения. Если же режим охлаждения был выбран неверно, то на оболочке (изоляции) могут возникнуть дефекты, которые отрицательно влияют на электрические характеристики, как, например, электрическая прочность. В данной работе приведен расчет режима охлаждения изоляции кабеля марки ВБШвнг(А) – 0,66 кВ.

Целью данного расчета было определение температуры внутренней поверхности изоляции и определение длины охлаждающей ванны для четырёх маркоразмеров.

Рассмотрим следующую модель охлаждения, приведенную на рис. 1. Сделаем допущения:

- процесс стационарный;
- теплофизические параметры постоянны;
- диффузией тепла в направлении оси z можно пренебречь.

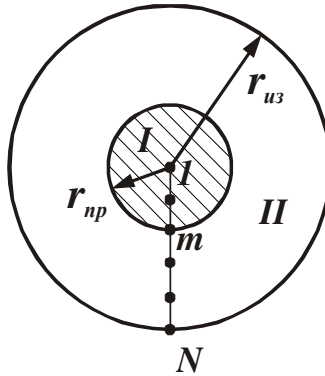


Рис. 1. Схема разбиения

Уравнения энергии для изоляции (1) и для жилы (2) соответственно будут иметь вид:

$$c_n \cdot \rho_n V_0 \frac{\partial T}{\partial z} = \lambda_n \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right), \quad (1)$$

$$c_n \cdot \rho_n V_0 \frac{\partial T}{\partial z} = \lambda_n \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right). \quad (2)$$

Граничные условия:

$$\lambda_n \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_n} = -\alpha (T - T_{\text{ср}}) \Big|_{r=r_n}, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0,$$

$$T_n \Big|_{r=r_n} = T_n \Big|_{r=r_n}, \quad \lambda_n \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_n} = \lambda_n \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_n}.$$

Начальные условия:

$$T_n \Big|_{z=0} = T_{\text{выхI}}, \quad T_u \Big|_{z=0} = T_{\text{выхII}}.$$

Для решения системы дифференциальных уравнений используется метод конечных разностей. Разностные уравнения (использована явная разностная схема) имеют вид:

$$c_u \cdot \rho_u V_0 \frac{T_{i,j+1} - T_{i,j}}{h_z} = \lambda_u \left(\frac{1}{r_i} \frac{T_{i+1,j} - T_{i-1,j}}{2h_r} + \frac{T_{i+1,j} - 2T_{i,j} + T_{i-1,j}}{h_r^2} \right), \quad (3)$$

где $\{i = 2 \dots m-1; j = 1 \dots M\}$.

$$c_n \cdot \rho_n V_0 \frac{T_{i,j+1} - T_{i,j}}{h_z} = \lambda_n \left(\frac{1}{r_i} \frac{T_{i+1,j} - T_{i-1,j}}{2h_r} + \frac{T_{i+1,j} - 2T_{i,j} + T_{i-1,j}}{h_r^2} \right), \quad (4)$$

где $\{i = m+1 \dots N-1; j = 1 \dots M\}$.

$$T_{2,j} = T_{1,j}, T_{N,j} = \frac{\frac{T_{N-1,j}}{h_r} + \frac{\alpha}{\lambda_u} T_{cp}}{\frac{1}{h_r} + \frac{\alpha}{\lambda_u}}, T_{m,j} = \frac{T_{m-1,j} \cdot \lambda_n + T_{m+1,j} \cdot \lambda_u}{\lambda_n + \lambda_u}. \quad (5)$$

Токопроводящая жила кабеля марки ВБШвнг(А) выполнена из меди. Для наложения изоляции используется ПВХ-пластикат пониженной горючести марки И40-13А. Ванна охлаждения имеет две секции: 1 – воздушное охлаждение, 2 – охлаждающая ванна;

Параметры режима охлаждения указаны в табл. 1.

Таблица 1

Параметры режима охлаждения

Марко-размер, мм	Радиус ТПЖ, мм	Радиус по изоляции, мм	Скорость изолирования, м/мин	$T_{\text{выхода1}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{выхода2}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{воздуха}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{воды}}, ^\circ\text{C}$
5×16	2,55	3,45	29,32	20	165	20	20
5×25	3,21	4,31	29,32				
5×35	3,78	4,88	29,32				
5×50	4,15	5,45	29,32				

Температура на внутреннем слое после выхода из охлаждающего устройства должна быть ниже 50 °С. Результаты расчета представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета

Марко-размер, мм	Температура, °С					
	Воздуха	На внутренней поверхности на выходе из агрегата	Воды	На внешней поверхности у входа в ванну	На внутренней поверхности на выходе из ванны	На внешней поверхности на выходе из ванны
5×16	20	165	20	144,1	46,11	21,8
5×25		165		146,93	48,72	21,74
5×35		165		147,25	48	21,5
5×50		165		147,1	47,88	21,35

Графики зависимости температуры внутренней поверхности от длины охлаждающей ванны представлены на рис. 2–5.

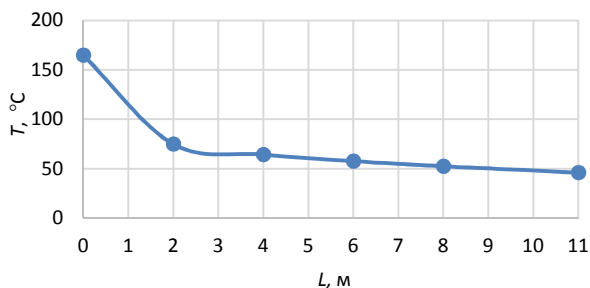


Рис. 2. График зависимости температуры внутренней поверхности изоляции от длины охлаждающей ванны для маркиразмера 5×16 мк

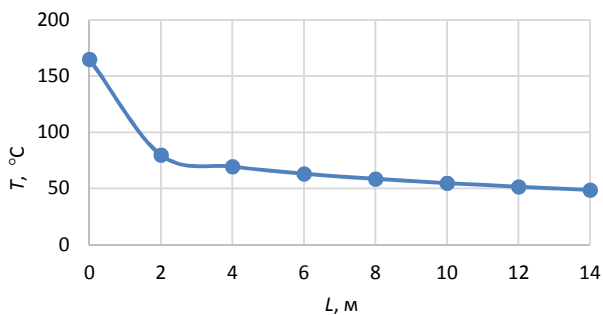


Рис. 3. График зависимости температуры внутренней поверхности изоляции от длины охлаждающей ванны для маркиразмера 5×25 мк

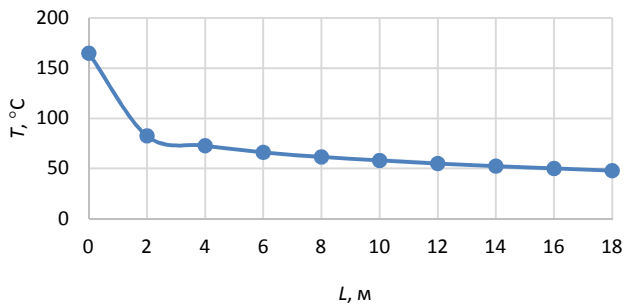


Рис. 4. График зависимости температуры внутренней поверхности изоляции от длины охлаждающей ванны для маркиразмера 5×35 мк

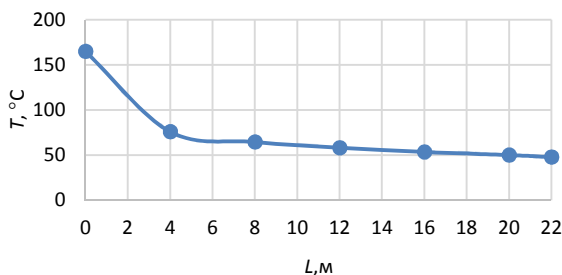


Рис. 5. График зависимости температуры внутренней поверхности изоляции от длины охлаждающей ванны для маркоразмера 5×50 мм

Были определены длины охлаждающих ванн для четырёх маркоразмеров. Для маркоразмера 5×16 мм длина охлаждающей ванны составляет 11 м, для маркоразмера 5×25 мм – 14 м, для маркоразмера 5×35 мм – 18 м и для маркоразмера 5×50 мм – 22 м.

Таким образом, с помощью расчета температурного поля в сечениях проводника и изоляции можно определить температуру внутренней поверхности изоляции после выхода из охлаждающего устройства. Исходя из того, что эта температура не должна превышать 50 °С, были определены длины охлаждающих ванн для различных маркоразмеров.

Библиографический список

1. Труфанова Н.М. Переработка полимеров: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2009. – 83 с.
2. Ковригин Л.А. Основы кабельной техники: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2006. – 94 с.

Сведения об авторах

Передернин Игорь Юрьевич – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КТЭИ-14-16, г. Пермь, e-mail: peredernini@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.С. Поздеева, Е.В. Субботин

ОЦЕНКА СРОКА СЛУЖБЫ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ КАБЕЛЬНЫХ ПВХ-ПЛАСТИКАТОВ

В работе описаны методики оценки срока службы полимерных материалов, основанные на использовании термического анализа. Рассматриваются способы определения кинетических параметров методами термогравиметрического анализа (ТГА). Приведены результаты экспериментальных исследований по определению энергии активации для кабельных ПВХ-пластиков.

Ключевые слова: полимер, термогравиметрический анализ, энергия активации, срок службы.

A.S. Pozdeeva, E.V. Subbotin

EVALUATION OF THE SERVICE LIFE OF POLYMERIC MATERIALS CABLE PVC COMPOUNDS

The paper describes methods for estimating the service life of polymer materials based on the use of thermal analysis. Methods are considered definitions of kinetic parameters using thermogravimetric analysis. The results of experimental studies on the determination of activation energy for PVC cable plastic compounds are presented.

Keywords: polymer, thermogravimetric analysis, activation energy, service life.

На сегодняшний день ПВХ-пластики, представляющие собой смесь поливинилхлоридной смолы с пластификаторами, стабилизаторами, наполнителями и другими компонентами, по-прежнему находят широкое применение в отечественной кабельной промышленности. Однако необходимо отметить, что в связи с ужесточением требований, предъявляемых к современным кабельным изделиям, возникает необходимость разработки новых рецептур кабельных ПВХ-пластиков, что придает серьезное практическое значение вопросу достоверной оценки срока службы данных материалов. В свою очередь, процедура оценки срока службы сводится к определению величины энергии активации процесса старения на основании экспериментальных данных, полученных при повышенных температурах и с последующим вычислением срока службы.

На сегодняшний день в мировой практике общепринятым стандартным методом определения кинетических параметров, а именно

энергии актив, является тепловое старение. Процедура представляет из себя серию экспериментов, по результатам которых могут быть построены зависимости измеряемого физического параметра от времени воздействия повышенной температуры.

Эксперименты проводятся при трех и более температурах и завершаются при достижении выбранного критерия отказа. Для ПВХ-пластиков общепринятым параметром является относительное удлинение при разрыве, критерием отказа – достижение 50 % его от исходной величины [2].

Основным недостатком данного метода является длительность. Для современных материалов полная серия экспериментов может занимать до полугода. Таким образом, при условии отсутствия жестких требований может быть оправданно применение более практичных методов, основывающихся на краткосрочных экспериментах.

В ряде случаев альтернативой термическому старению становится стандартная методика, основанная на использовании термогравиметрии анализа (ТГА). В рамках данного подхода материал, нагреваясь с различной скоростью, проходит через область разложения. Из полученных кривых нагрева, представленных на рис. 1, определяются температуры для постоянного уровня разложения.

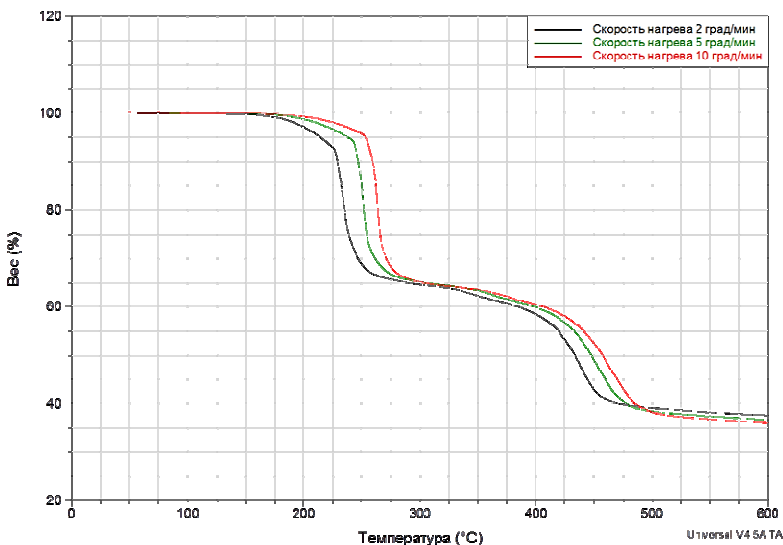


Рис. 1. Температурные зависимости потери массы для кабельного ПВХ-пластика

Затем из графика, представленного на рис. 2, при постоянном уровне разложения определяется кинетическая энергия активации.

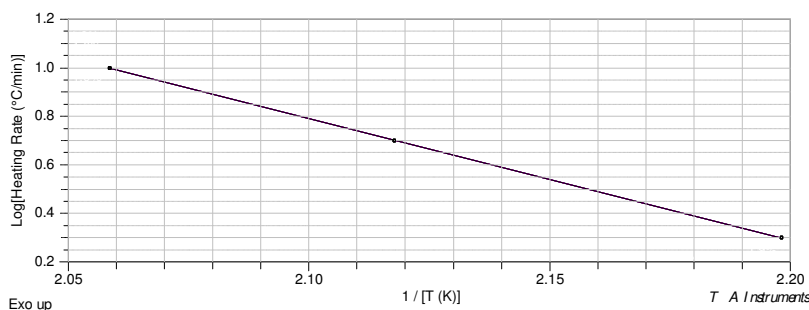


Рис. 2. Зависимость скорости нагрева от величины обратной абсолютной температуры для кабельного ПВХ пластиката

Эта энергия активации затем может быть использована для вычисления расчетного срока службы при заданной температуре или максимальной рабочей температуры для заданного расчетного срока службы [2].

Для расчета энергии активации используется метод Флинна и Уола [3]:

$$E = \frac{-R}{b} \cdot \left[\frac{d \log \beta}{d \left(\frac{1}{T} \right)} \right], \quad (1)$$

где E – энергия активации, Дж/моль; R – газовая постоянная, $R = 8,134$ Дж/(моль·К); m – наклон линии, $m = \frac{d \log \beta}{d(1/T)}$; b – постоянная, $b = 0,457/\text{K}$ для первой итерации; β – скорость нагрева, К/мин; T – температура постоянной конверсии, К.

Данная методика требует проведения, как минимум, трех экспериментов с различными скоростями нагрева для каждого материала. Общее время оценки материала при этом составляет меньше одного дня. Однако существенным недостатком данной стандартной методики является возможность использования её только для одностадийных процессов, что ограничивает ее применение для кабельных ПВХ-пластиков.

Указанных ограничений лишена методика, основанная на модулированной термогравиметрии (МТГ). Принципиальным отличием

данной методики от стандартной является наложение синусоидальных модуляций по температуре на основной профиль нагрева, как показано на рис. 3.

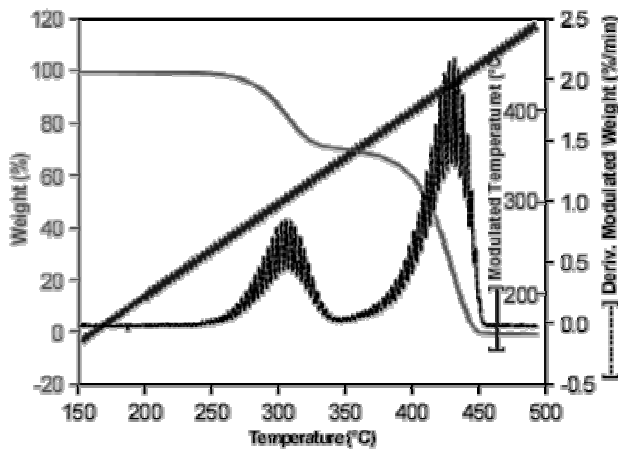


Рис. 3. Температурные зависимости потери массы и энергии активации

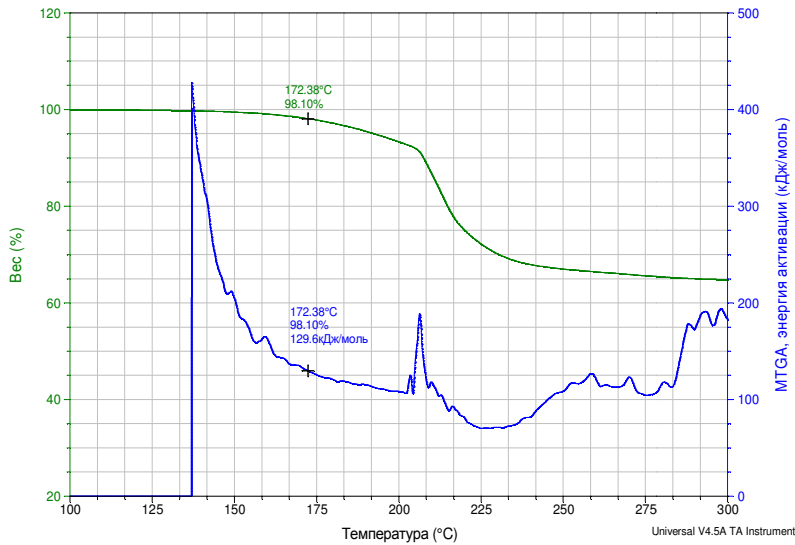


Рис. 4. Температурные зависимости потери массы и энергии активации для кабельного ПВХ-пластика

Это позволяет определить за один эксперимент энергию активации как функцию температуры. Результаты МТГ для кабельного ПВХ-пластиката показаны на рис. 4, из которого видно, что энергия активации действительно является функцией температуры, что является подтверждением многостадийности процесса разложения ПВХ-пластиката. Однако даже несмотря на то, что использование МТГ при постоянной скорости нагрева позволяет получить температурную зависимость энергии активации, данный подход не позволяет разделить процесс деструкции полимера на стадии, что может оказаться критичным при прогнозировании срока службы материала, когда требуется использовать энергию активации конкретной реакции, протекающей в определенном температурном диапазоне.

В подобных случаях МТГ может быть использована в сочетании с квазиизотермическими условиями. В данном случае модуляции накладываются на горизонтальную прямую, представляющую собой основной температурный профиль эксперимента.

На рис. 5 представлены результаты эксперимента с использованием МТГ, в котором кабельный ПВХ-пластикат выдерживался при температуре 150 °С, и как видно из эксперимента, энергия активации при данной температуре практически не изменяется.

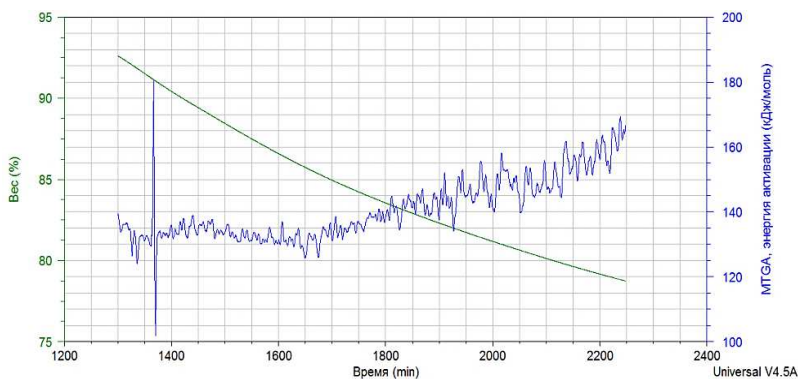


Рис. 5. Зависимости потери массы и энергии активации (квазиизотерма) от времени выдержки при постоянной температуре в режиме МТГ для кабельного ПВХ-пластиката

Подводя итог выполненной работы, можно сделать вывод, что преимуществом МТГ по сравнению со стандартной методикой является возможность получения энергии активации при постоянной

температуре и как функции температуры для одностадийных и многостадийных процессов, а в общем случае использование термического анализа может существенно сократить время определения кинетических параметров, необходимых для оценки срока службы полимерных материалов.

Библиографический список

1. Барашков О.К. Некоторые критические замечания относительно методов предсказания сроков службы кабельных ПВХ-пластиков // Кабель-news. – Сентябрь 2008. – № 9.
2. ASTM E1641-99. Standard Test Method for Decomposition Kinetics by Thermogravimetry.
3. Flynn J.H. [et al.] // Polym. Lett. – 1966.

Сведения об авторах

Поздеева Анжелика Сергеевна – студентка Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КТЭ-17-1м, г. Пермь, e-mail: pozdeeva.lika@yandex.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.А. Путилова, Н.М. Труфанова

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЁТА МАРШРУТА ВОЛОК ДЛЯ ВОЛОЧЕНИЯ ПРОВОЛОКИ

В данной статье представлена программа по автоматическому расчету маршрута волок. Даны сравнение и анализ полученных результатов при волочении медной проволоки диаметром от 0,80 до 0,20 миллиметров с данными, рассчитанными аналитическим методом.

Ключевые слова: волока, проволока, маршрут волок.

A.A. Putilova, N.M. Trufanova

AUTOMATION OF CALCULATION OF A ITINERARY DRAW PLATE FOR WIRE DRAWING

This article presents a program for automatic calculation of the die. Comparison and analysis of the results obtained, when drawing copper wire with a diameter of 0.80 to 0.20 millimeters, with the data calculated by the analytical method.

Keywords: die, wire, a itinerary draw plate.

Получение проволоки на кабельных предприятиях происходит путём протягивания заготовки через ряд волочильных инструментов – волок, диаметр которых уменьшается с каждым проходом до необходимого диаметра. Для получения проволоки заданных размеров рассчитывается маршрут волок, данный расчет занимает достаточно долгий промежуток времени. От верно построенного маршрута зависит качество процесса волочения, а значит, и качество производимой проволоки. Цели создания программы по автоматическому расчёту маршрута волок – это обеспечение наиболее быстрого формирования технической документации и прокладывание маршрута волок для волочения проволоки.

Первоначально были созданы код и интерфейс программы с использованием языка программирования Delphi. Учитывая разнообразие материала, из которого производится проволока: медь, алюминий, алюминиевый сплав, в программе имеется строка с выпадающим списком вариантов материала заготовки. При выборе материала программа производит расчет, автоматически учитывая и применяя

необходимые коэффициенты. Также есть возможность выбора количества волок, для которых будут рассчитаны данный маршрут, ввод определённого процента обжата и шага по обжатию. Если обжатие превышает введённое значение, то происходит автоматический перерасчёт диаметров волок. Работа с программой состоит из двух шагов: 1-й шаг – ввод данных, 2-й шаг – запуск расчёта с помощью нажатия одноимённой кнопки «расчёт».

В качестве примера рассчитанного маршрута выбраны следующие начальные данные: начальный диаметр заготовки (d_0), равный 0,80 мм, конечный диаметр проволоки (d_n), равный 0,20 мм. Процент обжата составил 26 %, а шаг по обжатию = 0,5, материал заготовки – медь. На рисунке представлена программа с введёнными и рассчитанными значениями.

The screenshot shows a software window titled "Form1" with three main sections: "Выбор размеров" (Size Selection), "Выбор материала" (Material Selection), and "Дополнительные настройки" (Additional Settings).

- Выбор размеров:** "Исходный диаметр проволоки, d0, мм" is 0.8; "Конечный диаметр на выходе, dn, мм" is 0.2. A "Расчет" (Calculate) button is present.
- Выбор материала:** A dropdown menu shows "Медь" (Copper).
- Дополнительные настройки:** "Постоянное обжатие, %" is 26; "Шаг по обжатию" is 0.5. There are checkboxes for "Const" and "Число волок" (Number of fibers).

Below the settings, it says "Количество волок 11". A table displays calculated values for 10 fibers:

№ волокна	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d, мм	0.688	0.595	0.518	0.453	0.398	0.351	0.311	0.277	0.248	0.222
Обжатие, %	18.95	25.19	24.34	23.56	22.81	22.09	21.40	20.75	20.12	19.52
Удлинение, %	23.37	33.68	32.17	30.81	29.54	28.35	27.23	26.18	25.19	24.25

Рис. Программа с введёнными и рассчитанными значениями

В таблицу выводится рассчитанный маршрут:

- диаметр, мм;
- обжатие, %;
- удлинение, %.

Для расчёта маршрута волок без использования программы необходимо определить количество волок. Данные коэффициентов C и α берутся из табл. 1.

$$\kappa = \frac{\lg(d_0^2 / d_{\kappa}^2)}{C - \alpha \lg(d_0^2 / d_{\kappa}^2)}. \tag{1}$$

Таблица 1

Значение коэффициентов C и α

Диаметр заготовки, мм	Медь		Алюминий	
	α	C	α	C
16,0-4,5	0,03	0,20	0,03	0,18
4,49-1,0	0,03	0,19	0,03	0,16
0,99-0,4	0,02	0,14	0,02	0,12
0,39-0,2	0,01	0,12	0,01	0,11
0,19-0,1	0,01	0,11	0,01	0,10

Далее рассчитывается диаметр каждой волоки по формуле:

$$\lg d_n = \lg d_0 - \lg \frac{d_0}{d_k} \cdot \frac{1 + \alpha k}{k} \cdot \frac{n}{1 + \alpha n}, \quad (2)$$

где n – номер промежуточной волоки.

В конечном итоге находятся вытяжка по проходам μ и обжатие

δ . Расчёт производится по формулам*:

$$\mu = \frac{d_{n-1}^2}{d_n^2} = \frac{d_0^2}{d_k^2}, \quad (3)$$

$$\delta = \left(1 - \frac{1}{\mu} \right). \quad (4)$$

Рассчитаем количество волок:

$$k = \frac{\lg ((0,80 \cdot 0,80)/(0,20 \cdot 0,20))}{0,14 - 0,02 \lg ((0,80 \cdot 0,80)/(0,20 \cdot 0,20))} = 11.$$

Полученные значения расчёта диаметра волок, вытяжки и обжатия, сведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчёта

№ волоки	Диаметр волоки, d_k , мм	Вытяжка, μ	Обжатие, δ , %
1	0,69	1,35	0,26
2	0,60	1,34	0,25

* Костыгова Т.В. Технология производства провода. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2010. – 68 с.

№ волокни	Диаметр волокни, d_k , мм	Вытяжка, μ	Обжатие, δ , %
3	0,52	1,32	0,24
4	0,45	1,31	0,24
5	0,40	1,30	0,23
6	0,35	1,28	0,22
7	0,31	1,27	0,21
8	0,28	1,26	0,21
9	0,25	1,25	0,20
10	0,22	1,24	0,20
11	0,20	1,23	0,19

При сравнении ручных и программных расчетов был сделан вывод о том, что они совпадают, при этом автоматический занял меньше времени. В связи с этим, можно сделать вывод, что применение программы по автоматическому расчету маршрута волок целесообразно.

Сведения об авторах

Путилова Анастасия Алексеевна – студентка Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: liminor_777@mail.ru.

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

Н.А. Рябкова, А.В. Казаков

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ЧИСЛЕННОЙ РЕАЛИЗАЦИИ СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ ТЕЧЕНИЙ

В данной статье разработана и решена модель процесса совместного течения трех полимерных жидкостей двумя методами: подвижной сетки и смеси. Для численной реализации использован программный пакет ANSYS Polyflow.

Ключевые слова: сетка, смесь, течение, сравнение.

N.A. Ryabkova, A.V. Kazakov

COMPARISON METHODS OF NUMERICAL SOLUTION OF STRATIFIED FLOW

In this article has been developed and solved a model for the process of stratified flow of three polymeric liquids by two methods: a moving mesh and a mixture. For numerical realization was used the software ANSYS Polyflow.

Keywords: grid, mixture, flow, comparison.

Регулирование процесса соэкструзии остается очень сложным для реализации процессом, несмотря на все технические достижения в этой области. На сегодняшний момент современные компьютерные системы позволяют заменить проведение практических экспериментов менее затратным моделированием процесса. С этой целью для построения модели формирования полимерных изоляционных слоев использовался программный пакет Ansys Polyflow. Целью исследования является сравнение решения математической модели методом подвижной сетки и методом смеси.

Одновременная экструзия нескольких полимеров имеет множество преимуществ на производстве, однако реологические и физические свойства влияют на перераспределение полимеров внутри кабельной головки. Поэтому при моделировании процесса особое внимание уделяется области сходящегося трехслойного течения*. Схема расчетной области потока полимерных жидкостей в канале кабельной головки представлена на рис. 1.

* Юрыгин П.П. Исследование стратифицированного течения резиновых смесей в дулексных головках для выпуска заготовок кольцевого профиля: автореф. ... дис. канд. техн. наук (9.04.14). – Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2014. – 164 с.

С целью упрощения математической модели в работе были сделаны следующие допущения: процесс стационарный, массовые силы значительно меньше поверхностных, течение осесимметричное, на границах канала реализуется условие прилипания и непроницаемости, теплофизические характеристики постоянны.

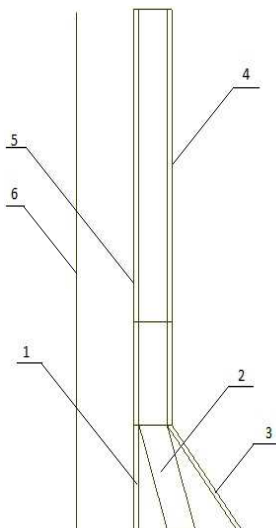


Рис. 1. Схема расчетной области трехслойного потока полимерных жидкостей:
1 – первый слой полимера; 2 – второй слой полимера; 3 – третий слой полимера;
4 – свободная поверхность; 5 – подвижная стенка; 6 – ось симметрии

Математическое описание процесса стратифицированного не-изотермического течения трех полимерных жидкостей в двумерной постановке основывается на решении системы уравнений, состоящей из закона сохранения массы, движения и энергии. С учетом введенных ранее допущений математическая модель примет вид:

$$\rho^m \cdot v_j^m \frac{\partial v_i^m}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial v_i^m}{\partial x_i} = 0 \quad i, j = 1, 2 \quad m = 1, 2, 3, \quad (2)$$

$$c\rho^m \cdot v_j^m \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \tau_{ij} \gamma_{ij}. \quad (3)$$

Зависимость вязкости от температуры определяется из уравнения Рейнольдса:

$$\mu = \mu_0 e^{-\beta(T-T_0)}, \quad (4)$$

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right). \quad (5)$$

В уравнениях (1)–(5) ρ – плотность, T – температура, C – теплоемкость, λ – теплопроводность, p – гидростатическое давление, μ – вязкость, являющаяся функцией скорости сдвига и температуры, μ_0 – начальная вязкость при температуре T_0 , v_i^m и v_j^m – компоненты скорости в слое m , β – температурный коэффициент вязкости, ρ^m – плотность слоя m , τ_{ij} – компоненты девиатора напряжений, γ_{ij} – тензор скоростей деформации.

На входных участках температура – 423 К. Температура на твердых стенках равна 443 К. На выходной границе ставится условие установившегося потока, температура жилы – 383 К. На границе контакта с подвижной жилой продольная компонента скорости равна скорости движения жилы (0,05 м/с).

Значения теплофизических и реологических свойств материалов экрана и изоляции приведены в таблице.

Свойства материала

Материал	Вязкость, Па·с	Плотность ρ , кг/м ³	Теплоемкость, С	Теплопроводность, λ , Дж/м/с/°С	Коэфф. аномалии, n	Температурный коэффициент вязкости β , 1/К
1	38523	1080	2500	0,182	0,251	0,0027
2	14946	779	2500	0,182	0,542	0,0168
3	38523	1080	2500	0,182	0,251	0,0027

На рис. 2 представлены схемы границ потоков, получившиеся в результате решения математической модели двумя способами. Из рисунка видно, что потоки имеют более четкие границы в методе подвижной сетки.

Анализ температурного поля, приведенного на рис. 3, показывает достаточно равномерный характер прогрева материала.

Максимальная температура при заданных расходах составляет 443,3 К, что выше температуры задаваемой на стенках каналов на 3,3 К и объясняется явлением диссипации энергии.

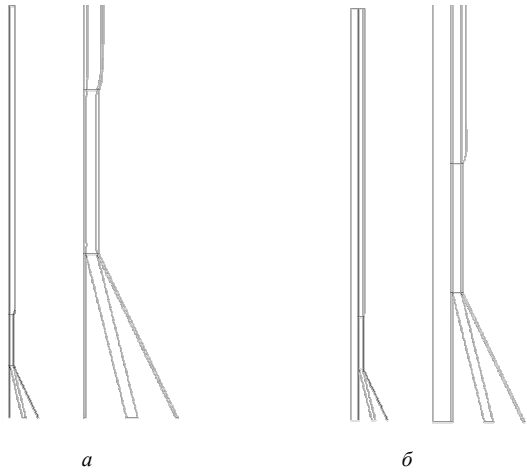


Рис. 2. Схемы границ потоков, получившихся в результате решения математической модели двумя способами: *a* – метод подвижной сетки; *б* – метод смеси

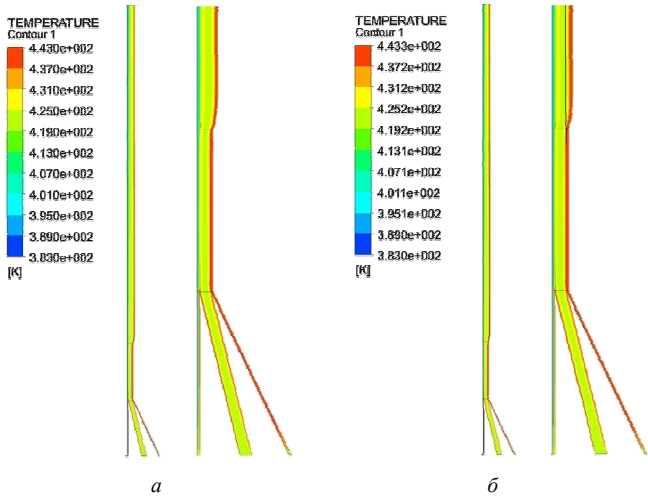


Рис.3. Анализ температурного поля: *a* – метод подвижной сетки; *б* – метод смеси

На рис. 4 представлены поля скоростей. Результаты моделирования показывают большую скорость в месте соединения трех потоков. Максимальная скорость потока на этом участке составляет 0,12 м/с в методе смеси и 0,1 в методе подвижной сетки.

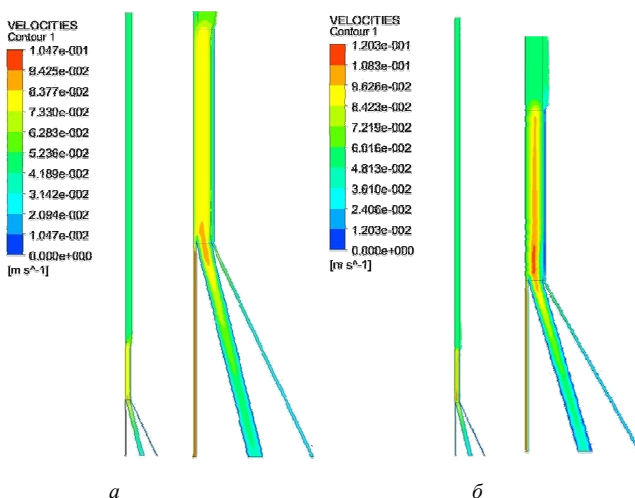


Рис. 4. Поля скоростей: *а* – метод подвижной сетки; *б* – метод смеси

В результате проведенных исследований была разработана и решена двумя методами модель процесса совместного течения трех полимерных жидкостей. Было выявлено, что метод подвижной сетки дает более четкие границы раздела потоков и наиболее подходит для численной реализации стратифицированных течений.

Сведения об авторах

Рябкова Наталья Андреевна – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КТЭ-16-1м, г. Пермь, e-mail: nataha170694@yandex.ru.

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

А.А. Тихомиров, Н.В. Соболев

АДАПТИВНОЕ УСТРОЙСТВО РЕЗЕРВИРОВАНИЯ ОТКАЗА ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ

В данной статье рассматривается возможность создания адаптивного устройства резервирования отказа выключателя, которое позволяет повысить надежность энергосистемы и уменьшить количество ложных срабатываний.

Ключевые слова: адаптивная часть, преобразование Фурье, преобразование Гильберта.

A.A. Tihomirov, N.V. Sobolev

ADAPTIVE CIRCUIT-BREAKER PROTECTION

This article considers possibility of building adoptive circuit breaker protection, which allows to increase reliability of energy system and decrease false operation.

Keywords: .Adaptive part, Fourier transforms, Hilbert transform.

Для повышения надежности работы энергосистемы используются устройства резервирования отказа выключателя (УРОВ), которые позволяют отключить поврежденный объект от энергосистемы при коротком замыкании даже при выходе из строя выключателя. Применение УРОВ связано с рядом трудностей, таких как селективность действия и времени срабатывания [1], что может влиять на динамическую устойчивость электроэнергетических систем, а также приводить к неоправданным экономическим издержкам. Для ускорения УРОВ в [2] предлагается дополнительно ввести вычислительный блок, который на основе метода симметричных составляющих позволяет определить тип короткого замыкания и его место. Такое решение позволяет увеличить эффективность работы УРОВ и динамическую устойчивость электроэнергетической системы в целом.

Микропроцессорные средства позволяют вводить элемент обучения релейной защиты, так, например, в [3, 4] рассмотрена методика построения обучаемой релейной защиты на основе многомерного дискретного пространства. В [5] показана возможность применения многомерного пространства для реле сопротивления с прямой адаптацией.

В настоящей работе рассмотрена адаптивная УРОВ, изменяющая алгоритм работы в зависимости от состояния сети на основе априорной информации. В предлагаемой схеме УРОВ, представленной на рис. 1, вводится адаптивная часть для сравнения заранее заложенных параметров тока короткого замыкания с фактическими значениями.

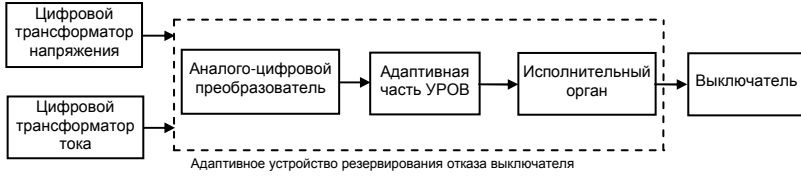


Рис. 1. Схема адаптивной релейной защиты

Так, с цифровых трансформаторов тока, которые подключается к защищаемому объекту, сигнал поступает на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и далее на вход адаптивной части УРОВ, где преобразуется в массив данных.

Заранее заложенными параметрами тока короткого замыкания в адаптивной части УРОВ для получения дополнительной информации об аварийном режиме предлагаются Фурье-спектр, огибающая, спектральная мощность и фаза сигнала, которые могут быть найдены из уже случившихся аварийных режимов или найдены теоретически, исходя из параметров энергосистемы.

Для нахождения действующего значения тока используется преобразование Фурье:

$$F(u) = \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{M-1} f(x) \left[\cos\left(\frac{2\pi ux}{M}\right) - i \sin\left(\frac{2\pi ux}{M}\right) \right], \quad (1)$$

где i – мнимая единица, $f(x)$ – оцифрованный сигнал на временной области, u – значение частоты, x – значение времени, M – число отчетов.

Исходя из (1) по полученному спектру сигнала вычисляется действующее значение тока по:

$$I_D = \sqrt{\frac{(\sum_{x=0}^{M-1} f(x) [\cos(\frac{2\pi ux}{M})])^2 + (\sum_{x=0}^{M-1} f(x) [\sin(\frac{2\pi ux}{M})])^2}{\sqrt{2}}}, \quad (2)$$

где $f(x) [\cos(\frac{2\pi ux}{M})]$ – действительная часть сигнала, $f(x) [\sin(\frac{2\pi ux}{M})]$ – мнимая часть сигнала.

Использование преобразования Фурье и цифровых фильтров позволяет с высокой точностью вычислять действующие значения тока и напряжения [6].

Длительность переходного процесса, которая может служить отдельным параметром для сравнения, определяется, исходя из амплитудных значений тока короткого замыкания, где амплитудные значения определяются на основе метода быстрой сортировки.

Далее на основе найденного значения длительности переходного процесса находятся фактические параметры:

– Фурье-спектр сигнала, который вычисляется по формуле:

$$F(u) = \sqrt{\left(\sum_{x=0}^{M-1} f(x) \left[\cos\left(\frac{2\pi ux}{M}\right)\right]\right)^2 + \left(\sum_{x=0}^{M-1} f(x) \left[\sin\left(\frac{2\pi ux}{M}\right)\right]\right)^2}; \quad (3)$$

– спектральная мощность и фаза рассчитываются по (4) и (5):

$$P(u) = \left(\sum_{x=0}^{M-1} f(x) \left[\cos\left(\frac{2\pi ux}{M}\right)\right]\right)^2 + \left(\sum_{x=0}^{M-1} f(x) \left[\sin\left(\frac{2\pi ux}{M}\right)\right]\right)^2, \quad (4)$$

$$\varphi = \arctg\left(\frac{\sum_{x=0}^{M-1} f(x) \left[\sin\left(\frac{2\pi ux}{M}\right)\right]}{\sum_{x=0}^{M-1} f(x) \left[\cos\left(\frac{2\pi ux}{M}\right)\right]}\right). \quad (5)$$

Для получения огибающей сигнала над ним проводят дискретное преобразование Гильберта:

$$x(n\Delta t) = 2\Delta u * \operatorname{Re} \left[\sum_{k=0}^N F(2k\Delta u) \exp\left(j \frac{2\pi kn}{N}\right) \right] + F_0 \Delta u, \quad (6)$$

$$\check{x}(n\Delta t) = 2\Delta u * \operatorname{Im} \left[\sum_{k=0}^N F(2k\Delta u) \exp\left(j \frac{2\pi kn}{N}\right) \right], \quad (7)$$

$$A = \sqrt{x(t)^2 + \check{x}(t)^2}, \quad (8)$$

где A – огибающая сигнала; $x(n\Delta t)$ – действительная часть сигнала, $\check{x}(n\Delta t)$ – мнимая часть сигнала; $F(2k\Delta u)$ – дискретное преобразование Фурье.

Сравнение по форме сигнала производится на основе гармонического состава заложенного априорно и полученного фактически с весовыми коэффициентами. Также делается сравнение совпадения спектральной мощности и превышения уставки. Для определения совпадения огибающих переходного процесса токов короткого замыкания предлагается разложение на ортогональные составляющие с их весовым сравнением.

Логика работы адаптивной части УРОВ показана на рис. 2.



Рис. 2. Логика работы адаптивной части УРОВ

В случае если выполняется условие (9), адаптивный терминал УРОВ дает команду на исполнительный орган, который отключает с помощью выключателя поврежденный объект от энергосистемы:

$$A \mid (B \& C \& D) = 1, \quad (9)$$

где A – превышение уставки, B – совпадение по форме сигнала, C – совпадение по динамике, D – совпадение по спектральной мощности.

Сравнение ортогональных составляющих, огибающей фактических параметров и мощности спектра с априорными значениями дает большую информацию о переходных процессах токов короткого замыкания, которые могут быть использованы для определения выдержки времени срабатывания адаптивной УРОВ, что должно способствовать уменьшению числа ложных срабатываний.

Библиографический список

1. Шабалина Ю.В., Абеуов Р.Б. Исследование влияния повышения быстродействия УРОВ на динамическую устойчивость генераторов ЭЭС // Электроэнергетика глазами молодежи: сб. докл. V Междунар. молодежной науч.-техн. конф. – Томск, 2014.
2. Васильева Ю.З., Митрофаненко А.Ю., Абеуов Р.Б. УРОВ с ускорением как средство повышения динамической устойчивости генераторов ЭЭС // Энергетика и энергосбережение: теория и практика: материалы III Всерос. науч.-практ. конф. (Кемерово, 13–15 декабря 2017 г.). – Кемерово, 2017. – С. 210.
3. Обучаемая релейная защита. ч.1. методы условных отображений / Ю.Я. Лямец, М.В. Мартынов, Г.С. Нудельман, Ю.В. Романов, П.И. Воронов // Электричество. – 2012. – № 2. – С. 15–19.

4. Обучаемая релейная защита. Ч. 2: Информационный портрет многомодульной распознающей структуры / Ю.Я. Лямец, М.В. Мартынов, Г.С. Нудельман, Ю.В. Романов, П.И. Воронов // Электричество. – 2012. – № 3. – С. 12–18.

5. Лямец Ю.Я., Воронов П.И., Мартынов М.В. Дискретная форма представления информации о защищаемом объекте в приложении к адаптивному реле // Электричество. – 2016. – № 9. – С. 29–34.

6. Ильинский А. Основы моделирования устройств релейной защиты и автоматики [Электронный ресурс]. – URL: <http://digital-substation.com/blog/2015/07/15/osnovy-modelirovaniya-ustrojjstv-rzia/> (дата обращения: 01.05.2018).

Сведения об авторах

Тихомиров Александр Андреевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Электроника и электроэнергетика» Петрозаводского государственного университета, физико-технического института, г. Петрозаводск, e-mail: sasha.82@mail.ru.

Соболев Никита Владимирович – студент Петрозаводского государственного университета, гр. 21616, г. Петрозаводск, e-mail: sobol-94@mail.ru.

Р.О. Токарев, Е.А. Чабанов

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НЕИСПРАВНОСТЕЙ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ

Рассмотрен метод анализа неисправностей синхронной машины с помощью метода спектрального анализа мгновенных значений тока статора. Была получена временная характеристика. Рассмотрены амплитудный и фазовый спектры периодического сигнала переходного процесса синхронной машины в опыте внезапного симметричного короткого замыкания (ВКЗ).

Ключевые слова: синхронная машина, мгновенные значения тока, преобразование Фурье, коэффициенты разложения, спектр.

R.O. Tokarev, E.A. Chabanov

SPECTRAL ANALYSIS OF FAULTS OF SYNCHRONOUS MACHINE

The method of analysis of faults of a synchronous machine by means of the method of spectral analysis of instantaneous values of the stator current is considered. A time characteristic was obtained. The amplitude and phase spectra of the periodic signal of the transient process of a synchronous machine in the experience of a sudden symmetrical short circuit are considered.

Keywords: synchronous machine, instantaneous value of currents, Fourier transformation, expansion coefficients, spectrum.

Синхронными называются электрические машины переменного тока, у которых частота вращения ротора находится в строго постоянном соотношении с частотой электрической сети, к которой они подключены (слово «синхронный» понимается как «одновременный»). Синхронные машины, как и все электрические машины, могут работать в режиме генератора и режиме двигателя, т.е. они обратимы.

В настоящее время большинство электрических станций оснащено трехфазными синхронными генераторами, которые являются основными источниками электроэнергии. Синхронные генераторы приводятся во вращение паровыми или гидравлическими турбинами, а в некоторых случаях – двигателями внутреннего сгорания. Мощность современных синхронных генераторов достигает 1500 МВА; проектируются энергоблоки и большей мощности. Мощные синхронные генераторы в большинстве случаев работают совместно (параллельно) друг с другом, и вырабатываемая ими энергия

поступает в общую электрическую сеть. Кроме того, синхронные генераторы служат источниками автономного питания на транспорте, в летательных аппаратах и на передвижных электростанциях.

Синхронные машины применяются там, где требуется постоянная частота вращения. Мощные синхронные машины устанавливаются на металлургических заводах, шахтах, холодильниках, на компрессорных и нефтеперекачивающих станциях магистральных трубопроводов, где они приводят во вращение прокатные станы, насосы, вентиляторы, компрессоры и т.п. Специальные синхронные машины малой мощности (микродвигатели) широко используются в системах управления и приборных системах: электрочасах, автоматических самопишущих приборах, устройствах программирования.

Ограниченные средства на ремонт оборудования часто вынуждают промышленные предприятия сокращать объем ремонта.

Оценка технического состояния синхронной машины представляет собой важную задачу, решение которой способствует повышению надежности, снижению аварийных ситуаций, сокращению расходов и потерь рабочего времени, связанных с внеплановыми ремонтами оборудования и технологическими неполадками, а также осуществлять переход от планово-предупредительных ремонтов к системе обслуживания по состоянию [7, 8].

Проблема обеспечения высокой надежности работы двигателей с каждым годом становится все более актуальной в России, так как старение оборудования значительно опережает темпы технического перевооружения. Наряду с этим эксплуатация неисправной синхронной машины также приводит к косвенным непродуктивным затратам электроэнергии, вызванным снижением коэффициента полезного действия ввиду дополнительных потерь и, как следствие, повышения потребляемых токов.

Для оценки технического состояния электрической машины можно измерить многие десятки параметров, однако такое измерение требует наличия большого числа приборов и больших затрат времени, что может свести эффективность применения диагностирования до минимума и даже привести к убыткам. Поэтому из совокупности параметров выбирают оптимальное их число и сочетание, обеспечивающее требуемую достоверность результатов диагноза при минимальных затратах. Часто приходится исключать из диагностического ряда параметры, несущие большой объем информации, но имеющие высокую стоимость измерения [1, 2, 4].

На сегодняшний день наиболее распространенным и быстро развивающимся является метод спектрального анализа и различные его модификации. Существует множество различных методик реализации данного метода, ниже приводится методика, основанная на спектральном анализе мгновенных значений тока статора [5, 6].

Предлагаемая методика была уже апробирована на асинхронной машине и дала положительные результаты [1, 2, 6]. Проверим ее применительно к синхронной машине посредством мониторинга мгновенного значения тока, разложением его в гармонический ряд, используя коэффициенты ряда Фурье. Проведем спектральный анализ, что позволит с высокой точностью определить состояние различных элементов электродвигателя и выделить характерные виды неисправностей. Объектом исследований в данной работе явилась мощная синхронная машина ТТК-50-2УЗ-П мощностью 50 МВт. Предметом исследований стали переходные процессы, протекающие в обмотках статора синхронной машины в опыте ВКЗ.

Коэффициенты разложения ряда Фурье определяются в виде обобщённых формул:

$$a_n = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^{n-1} f(i) \cos \frac{k\pi i}{N}; \quad (1)$$

$$b_n = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^{n-1} f(i) \sin \frac{k\pi i}{N}, \quad (2)$$

где N, K – количество мгновенных значений исследуемого мгновенного тока в опыте ВКЗ, i – текущее мгновенное значение тока в опыте ВКЗ.

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}, \quad (3)$$

$$\varphi_n = \arctan \frac{b_n}{a_n}, \quad (4)$$

где $\omega_1 = 2f\pi n$ – основная частота (частота первой гармоники); $n = 1, 2, 3, \dots$

Амплитуды гармоник A_n характеризуют амплитудный спектр, а начальные фазы φ_n – фазовый спектр. Для математической обработки сигналов применялись средства программного пакета LabView [3] (программа представлена на рис. 1).

LabView представляет собой мощную и гибкую среду графического программирования, которая широко используется в промышленности, образовании и научно-исследовательских лабораториях в качестве стандартного инструмента для сбора данных и управления приборами.

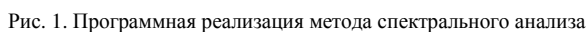


Рис. 2. Временная диаграмма мгновенных значений тока в опыте ВКЗ



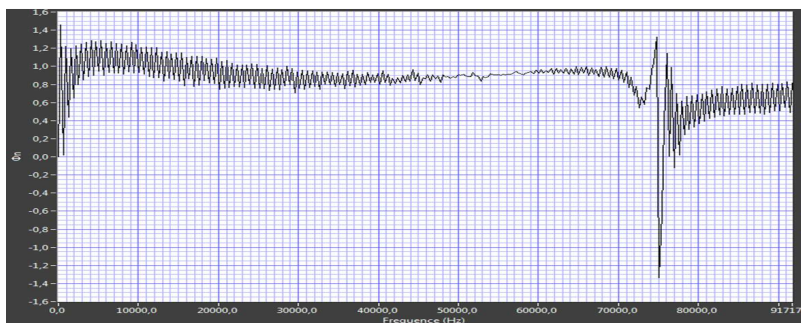


Рис. 4. Фазовый спектр тока

На рис. 3 и рис. 4 приведены амплитудный и фазовый спектры периодического сигнала испытуемой синхронной машины в опыте ВКЗ. Каждая гармоническая составляющая изображена вертикально, длина каждой (в масштабе) равна ее амплитуде и фазе.

Согласно рис. 3 и 4 на графиках помимо основной гармоники присутствуют дополнительные, что свидетельствует, по аналогии с асинхронной машиной, о возможном наличии неисправностей в синхронной машине. Для достоверной оценки качественного состояния синхронной машины и выявления ее неисправных узлов необходимо проводить дальнейшие исследования. В результате этих исследований будут определены соответствия возникающих на спектре дополнительных гармоник с вызвавшими их неисправностями синхронной машин.

Библиографический список

1. Жизневский В.А., Тюленев М.Е. Методика спектрографического анализа состояния асинхронного двигателя // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления, 2013. – С. 94–99.
2. Бурцев А.Г., Дягилева Т.В., Пан А.Г. Спектральный анализ тока статора трехфазного асинхронного двигателя при аварийных режимах работы // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 2–1. – 8 с.
3. Васильев А.С., Лашманов О.Ю. Основы программирования в среде LabView. – СПб.: Изд-во Санкт-Петербург. нац. исслед. ун-та информат. технологий, механики и оптики. – 2015. – 82 с.

4. Петухов В.С., Соколов В.А. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока // Новости электротехники. – 2005. – № 1(31). – С. 50–52.

5. Чабанов Е.А. Новый подход к исследованию и идентификации переходных процессов мощных синхронных машин по результатам стендовых испытаний: автореф. дис... канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2015. – 24 с.

6. Сафин Н.Р. Совершенствование методики токовой диагностики асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором: автореф. дис... канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2017. – 24 с.

7. Чабанов Е.А., Судаков А.И., Шулаков Н.В. Новые подходы к получению исходной информации и методам идентификации переходных процессов мощных синхронных машин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2013. – № 8. – С. 114–127.

8. Судаков А.И., Чабанов Е.А., Шутемов С.В. Новые подходы к погрешностному анализу результатов исследования и идентификации переходных процессов мощных синхронных машин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2013. – № 8. – С. 166–172.

Сведения об авторах

Токарев Роман Олегович – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ЭМ-14-1пб, г. Пермь, e-mail: ju11071996@yandex.ru.

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

А.М. Турпак, А.Т. Ключников, Г.В. Буторин

УПРАВЛЕНИЕ ПОГРУЖНЫМ ЛИНЕЙНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С УЧЁТОМ ПОЛОЖЕНИЯ ШТОКА

В статье рассмотрен один из необходимых шагов к созданию алгоритма векторного управления цилиндрическим линейным вентильным двигателем (ЦЛВД) – регистрация конечного положения вторичного элемента ЦЛВД. Построена математическая модель двигателя в Ansys Maxwell, выполнено моделирование для различных конструкций края вторичного элемента. На основе полученных результатов предложен критерий для регистрации конечного положения.

Ключевые слова: преобразователь частоты, широтно-импульсная модуляция напряжения, цилиндрический линейный вентильный двигатель, бездатчиковый реверс линейного двигателя.

A.M. Turpak, A.T. Klyuchnikov, G.V. Butoryn

DIMENSIONAL LINEAR ENGINE CONTROLLED WITH STOCK POSITION

The article considers one of the necessary steps to the creation of a vector control algorithm for a cylindrical linear synchronous valve motor (CLEM), the registration of the final position of the secondary element of the CLEM. The mathematical model of the engine in the Ansys Maxwell is constructed, the modeling for various designs of the edge of the Tuesday element is carried out. Based on the results obtained, a criterion was proposed for recording the final position.

Keywords: frequency converter, pulse width modulation of voltage, cylindrical linear valve motor, sensorless reverse linear motor.

Задачи увеличения добычи нефти, повышения механизированных способов добычи постоянно выдвигают необходимость создания новых конструкций глубинного насосного оборудования и дальнейшего совершенствования бесштанговых электронасосных агрегатов (ПНБНА).

В процессе эксплуатации высокодебитных скважин их дебит уменьшается, и они переходят в разряд средне- и малodeбитных скважин, при этом для более эффективной добычи нефти центробежные насосы заменяются на плунжерные с возвратно-поступательным движением плунжера от станков-качалок.

Для увеличения КПД установки используют погружные установки с асинхронными двигателями. Однако возможно значительно увеличить продуктивность, используя привод бесштангового насоса, в состав которого входит цилиндрический линейный вентильный двигатель с постоянными магнитами [1]. Прототип цилиндрического линейного вентильного двигателя представлен на рис. 1.



Рис. 1. Цилиндрический линейный вентильный двигатель

В его состав входят цилиндрический корпус, индуктор с трехфазными обмотками, а также вторичный элемент с постоянными магнитами для линейного движения вдоль оси корпуса.

Методики расчета управления ЦЛВД с постоянными магнитами отсутствуют, что существенно затрудняет процесс внедрения таких двигателей в промышленность. Разработка комплекта методик для управления и расчёта ЦЛВД для привода БЭНА является очень важной и актуальной задачей.

Таким образом, разработка эффективной методики векторного управления ЦЛВД является актуальной целью.

И, как следствие, необходимо решить следующие задачи:

- изучить распределение магнитного поля в двигателе;
- исследовать изменение краевых эффектов при приближении конца вторичного элемента
- создать методику косвенной регистрации края вторичного элемента.

Для построения расчетной модели ЦЛВД используется пакет Ansys Maxwell (рис. 2). В основе пакета лежит численный метод решения дифференциальных уравнений – метод конечных элементов, основанный на решении уравнений Максвелла [2, 3].

Магнитное поле машины рассматривается в 2-мерной цилиндрической системе координат (изменение магнитного поля вдоль тангенциальной координаты не учитывается);

– ферромагнитные материалы ротора и статора представляются средами с нелинейными, но изотропными свойствами;

– действительное токораспределение обмотки статора заменяется расчетным с сохранением реальной геометрической конфигурации обмоток и реальных значений их намагничивающих сил.

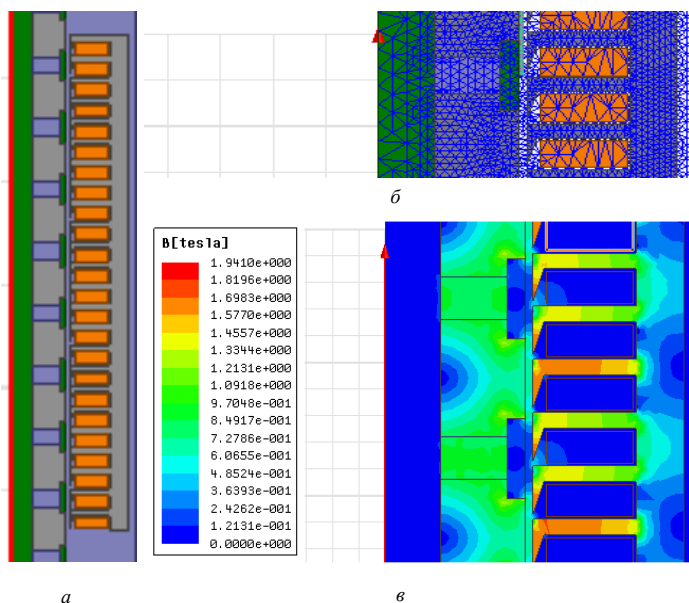


Рис. 2. Геометрия ЦЛВД в программной среде Ansys Maxwell (*а*); разбиение сетки для ЦЛВД (*б*); распределение магнитной индукции ЦЛВД при нулевом положении вторичного элемента (*в*)

Основной идеей для регистрации конечного положения ротора стало преобразование продольного краевого эффекта как недостатка в преимущество.

Основным критерием изменения конструкции вторичного элемента было минимальное влияние на общую конструкцию штока. В [4] рассматриваются различные типы специальных конструкций из магнитов для усиления магнитной индукции с необходимой стороны индуктора, на основе которых были разработаны методы изменения вторичного элемента линейного двигателя.

Таким образом, были отобраны следующие основные конструкции:

- установка дополнительного кольцевого магнита для увеличения магнитной индукции полюса (рис. 3, б). Величина второго от края полюса уменьшена таким образом, чтобы в оставшееся пространство помещалось магнитное кольцо, как и на остальных полюсах;
- усиление магнитной индукции посредством применения радиально намагниченного магнита в составе специальной сборки [4] (рис. 4, а);
- тоже самое с максимальным объёмом заполнения магнитом (рис. 4, б).

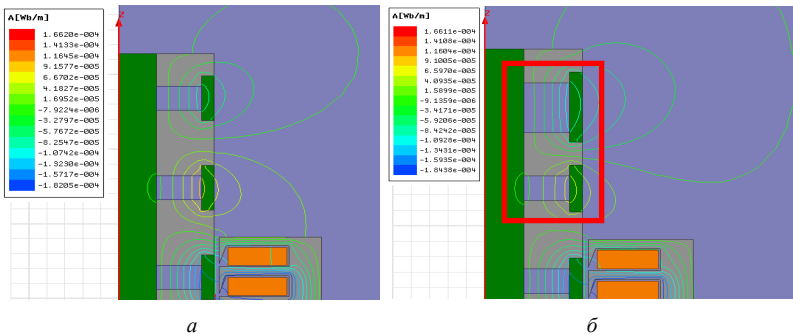


Рис. 3. Стандартная конструкция вторичного элемента ЦЛВД (а); удвоенное магнитное кольцо в конце вторичного элемента, конструкция №1 (б)

Основным критерием выбора подходящей конструкции стала возможность регистрации магнитного поля. Так как конструктивные изменения единичного полюса приведут к крайне незначительным изменениям ЭДС самоиндукции и потребляемого тока, было решено отталкиваться от изменения амплитудного значения определённой гармоники магнитного поля.

Анализ рис. 5 показал, что конструкция № 3 вносит дополнительные гармонические колебания магнитного поля.

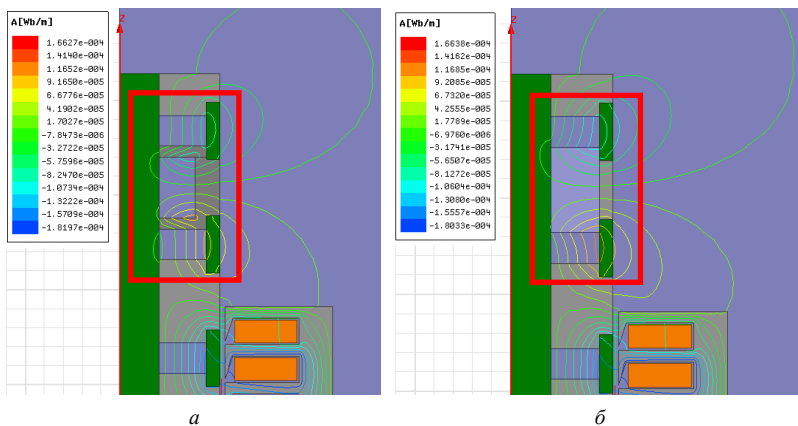


Рис. 4. Специальная сборка с магнитным кольцом (радиально намагниченным), равного по размерам с основными магнитами, конструкция №2 (а); специальная сборка, где использовано максимально возможное сечение кольца, конструкция №3 (б)

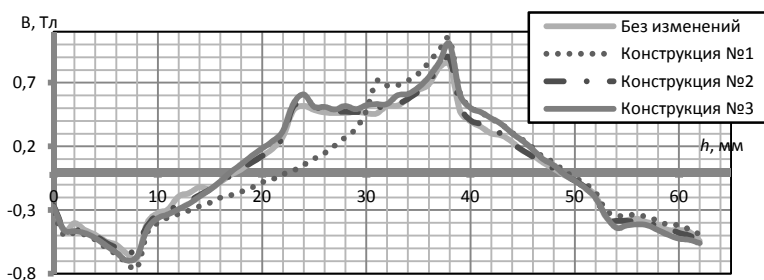


Рис. 5. Распределение магнитной индукции вдоль второго магнитного полюса вторичного элемента для разных конструкций

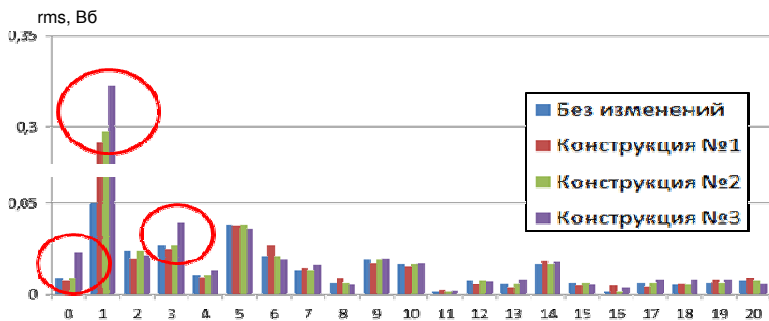


Рис. 6. Гармонический состав магнитной индукции специального полюса

Спектральный анализ кривых графика на рис. 5 позволяет получить амплитудные значения гармоник магнитной индукции (рис. 6). После анализа графиков распределения магнитной индукции специального полюса (см. рис. 5) очевидно, что значительные изменения вносят первый и третий варианты.

Заключение

1. Конструкция № 3 вносит наибольшее изменение в амплитуду третьей гармоники в сравнении с величиной оригинальной конструкции, которая проще всего поддаётся регистрации.

2. При наличии микропроцессорного устройства для выполнения быстрого преобразования Фурье лишь до 10-го значения гармоники возможно регистрировать подобные скачки магнитной индукции и, как следствие, окончание штока двигателя.

3. Дальнейший шаг – провести практическое исследование, внеся необходимые изменения в конструкцию прототипа для подтверждения либо опровержения подобного подхода.

4. Проведённые исследования позволяют создать алгоритм векторного управления для цилиндрического линейного вентильного двигателя.

Библиографический список

1. Ключников А.Т., Коротаев А.Д., Шутемов С.В., Моделирование цилиндрического линейного вентильного двигателя // Электротехника. – 2013. – № 11. – С. 14–17.

2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле: учебник. – 9-е изд., перераб. и доп. – М.: Гардарики, 2001. – 317 с.

3. Беляев Е.Ф. Шулаков Н.В. Дискретно-полевые модели электрических машин: учеб. пособие. Ч. I, II. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2009. – 457 с.

4. Казначеев С.А. Зименкова Т.С., Краснов А.С. Сравнительный анализ вариантов сборок магнитных полюсов на основе массива Хальбаха. – СПб.: Изд-во Петербург. гос. ун-та путей сообщ. Императора Александра I, 2017. – 11 с.

Сведения об авторах

Турпак Александр Михайлович – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ЭМ-16-1м, г. Пермь, e-mail: Turpak.Alexander@gmail.com.

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

Буторин Георгий Васильевич – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ЭМ-14-1пб, г. Пермь, e-mail: ButorinGV@gmail.com.

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

РАСЧЕТ ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ КАБЕЛЯ С ПВХ-ИЗОЛЯЦИЕЙ

В данной статье рассмотрено влияние диэлектрических потерь в изоляции из ПВХ-пластиката для кабелей на 6 и 10 кВ. Обоснована необходимость учета потерь в изоляции для кабелей на напряжение свыше 6 кВ при определении номинальной токовой нагрузки.

Ключевые слова: диэлектрические потери, ПВХ, изоляция.

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

CALCULATION OF THERMAL FIELD OF CABLE WITH PVC INSULATION

In this article, the effect of dielectric losses in PVC insulation for cables of 6 kV and 10 kV is considered. The necessity to take into account losses in insulation for cables for voltage over 6 kV in determining the rated current load is substantiated.

Keywords: dielectric losses, PVC, insulation.

Задача исследования тепловых полей в кабельных линиях является актуальной в настоящее время, так как способствует определению оптимальных нагрузочных режимов. Пропускная способность кабельных линий напрямую зависит от температурного режима, на который влияет множество факторов. Численное моделирование различных вариантов режима работы позволяет получить распределение температур, в том числе и при аварийно-опасных условиях, без вреда для реальных кабельных линий.

В работе рассматривается кабель АВВГ сечением 150 мм² на напряжение 6 кВ. Математическая модель теплообмена основывается на законах сохранения массы, количества движения и энергии [1].

При создании математической модели процессов тепломассопереноса сделаны следующие допущения:

- задача стационарная;
- на границах раздела разнородных сред реализуется условие идеального теплового контакта;
- реализуется ламинарный режим движения воздуха;
- воздух вокруг кабеля удовлетворяет приближению Буссинеска;
- свойства материалов постоянны.

С учетом сделанных допущений система дифференциальных уравнений имеет вид (1–6):

$$U_x \frac{\partial U_x}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_x}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial U_x}{\partial y} \right); \quad (1)$$

$$U_x \frac{\partial U_y}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_y}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial U_y}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial U_y}{\partial y} \right) + g\beta(t - t_0); \quad (2)$$

$$U_x \frac{\partial \rho}{\partial x} + U_y \frac{\partial \rho}{\partial y} = \rho \left(\frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_y}{\partial y} \right); \quad (3)$$

$$\rho c \left(U_x \frac{\partial t}{\partial x} + U_y \frac{\partial t}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \lambda \frac{\partial t}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \lambda \frac{\partial t}{\partial y}; \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{\kappa} \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{\kappa} \frac{\partial}{\partial y} \right) + q_v = 0; \quad (5)$$

$$\rho(t) = \rho_0 [1 - \beta(t - t_0)], \quad (6)$$

где x, y – декартовы координаты; U_x, U_y – компоненты вектора скорости воздуха; t – температура; P – отклонения давления воздуха от гироскопического; g – ускорение свободного падения; ρ, μ, λ – плотность, вязкость и теплопроводность воздуха; ρ_0 – плотность воздуха при температуре $t_0 = 20^\circ \text{C}$; q_v – мощность внутреннего источника тепла; β – температурный коэффициент плотности воздуха; λ_{κ} – теплопроводность изоляции кабеля.

Мощность внутренних источников тепла определяется согласно закону Джоуля–Ленца по формуле:

$$q_v = \iint_S \frac{I_1^2}{\sigma_1} dS, \quad (7)$$

где I_1^2 – номинальный ток токопроводящей жилы кабеля; σ_1 – коэффициент удельной электропроводности токопроводящей жилы кабеля.

На рис. 1 представлено тепловое поле кабеля и окружающего воздуха. При моделировании работы кабельных линий необходимо учитывать все возможные источники тепла, в том числе диэлектрические потери, которые в ПВХ-изоляции могут быть существенными.

Диэлектрические потери на единицу длины в каждой фазе рассчитываются по формуле [2, 3]:

$$W_d = \omega C U_0^2 \operatorname{tg} \delta, \quad (8)$$

где $\omega = 2\pi f$; C – емкость на единицу длины; U_0 – напряжение; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь.

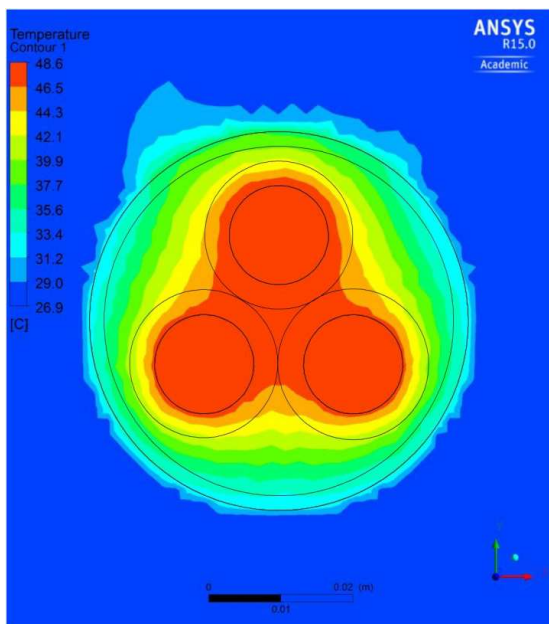


Рис. 1. Тепловое поле в кабеле на напряжение 6 кВ и окружающем воздухе

Емкость для круглых жил определяется по формуле:

$$C = \frac{\epsilon}{18 \ln \left(\frac{D_i}{d_c} \right)} 10^{-9}, \quad (9)$$

где ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость изоляции; D_i – наружный диаметр по изоляции; d_c – диаметр жилы.

На рис. 2 представлено тепловое поле кабеля и окружающего воздуха с учетом диэлектрических потерь.

Максимальное значение температуры отличается на $0,5^\circ\text{C}$.

Согласно МЭК-60278-1-1 для кабелей с изоляцией из ПВХ-пластиката на напряжение 10 кВ необходимо учитывать диэлектрические потери в изоляции. На рис. 3 представлено тепловое поле для кабеля на 10 кВ.

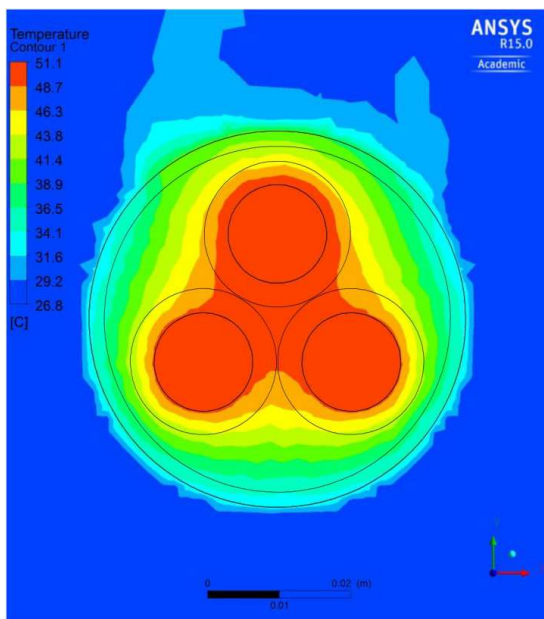


Рис. 3. Тепловое поле в кабеле на напряжение 10 кВ и окружающем воздухе

Максимальное значение температуры отличается на $2,5^{\circ}\text{C}$.

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что диэлектрические потери в кабелях ниже 10 кВ приводят к несущественным нагревам. При напряжении 10 кВ и выше необходимо учитывать потери в изоляции и увеличение температуры эксплуатации при определении номинальной токовой нагрузки.

Библиографический список

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

2. Хвостов Д.В., Бычков В.В., Дмитриев Ю.Д. Диэлектрические свойства полимеров для медных кабелей связи // Кабель-news. – 2009. – № 6–7. – С. 93–95.

3. ГОСТ Р МЭК 60278-1-1-2009. Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки.

Сведения об авторах

Феофилова Наталья Владимировна – студентка Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. МЭ-14-16, г. Пермь, e-mail: natasha_feofilova@mail.ru.

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

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

М.Г. Фертиков, И.Я. Дятлов, Н.М. Труфанова

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ГРЕЮЩЕГО КАБЕЛЯ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В данной статье было рассмотрено моделирование процессов тепломассопереноса между различными конструкциями греющих кабелей и трубы с водой с учетом естественной конвекции. Определены зависимости температуры воды в трубе от количества нагревательных кабелей, выделяемой мощности и размера нагревательной матрицы.

Ключевые слова: греющий кабель, нагревательная матрица, температурное поле, тепломассоперенос, конвекция, выделяемая мощность, тепловой поток.

M.G. Fertikov, I.Ya. Djatlov, N.M. Trufanova

RESEARCH OF THE THERMAL MODES OF THE HEATING CABLE OF VARIOUS CONSTRUCTIONS

In this article modeling of heat and mass transfer processes between different designs of heating cables and pipes with water taking into account natural convection was considered. The dependence of the temperature of the water in the pipe from a number of heating cables from the selected power and the size of the heating matrix.

Keywords: heating cable, heating matrix, temperature field, heat and mass transfer, convection, allocated power, heat flow.

На практике возникает необходимость в поддержании температуры трубопроводов с жидкими веществами. Для этого используют разные способы обогрева, одним из которых является нагрев греющим кабелем. При их эксплуатации следует учитывать множество факторов, таких как конструкция кабеля, приложенная мощность, объект обогрева и его характеристики, параметры окружающей среды и т.д. Следовательно, при выборе конструкции необходимо знать, как каждый из факторов повлияет на эффективность работы.

В современной научной литературе к вопросу анализа тепловых процессов при использовании греющего кабеля посвящен ряд статей. В статье [1] описывается моделирование температурного поля в нефтяной скважине с греющим кабелем. Авторами [2] рассмотрено применение теплового расчета в нефтепроводе, оснащенного системой электроподогрева. Математическое моделирование обогрева систем

водоснабжение и водоотведения в суровых условиях описывается в материале [3]. В [4] приведено решение задачи тепломассопереноса при прокладке кабеля в здании.

Для оценки влияний различных факторов на эффективность работы кабеля была создана математическая модель греющего кабеля, проложенного вдоль теплоизолированной трубы с водой. Схематичные изображения рассматриваемых объектов приведены на рис. 1.

Схематическое изображение рассматриваемой конструкции:

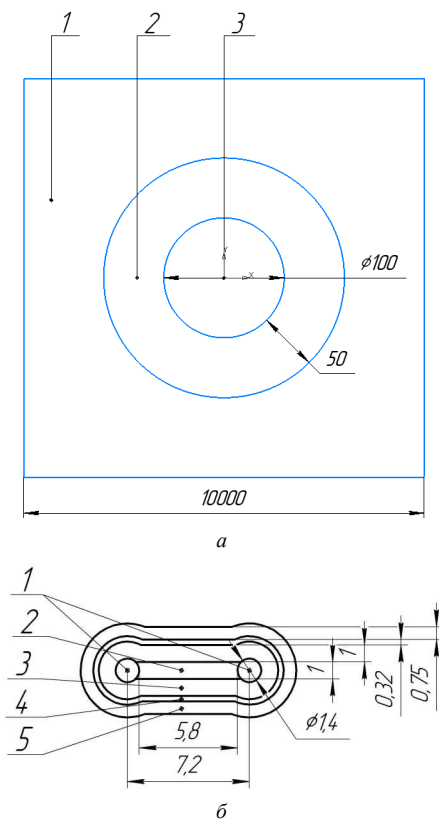


Рис. 1. Изолированная труба с геометрическими размерами (а): 1 – воздушная среда; 2 – изоляция из сшитого полиэтилена; 3 – труба с водой; рассматриваемый нагревательный кабель с используемыми материалами (б): 1 – некилированная медная жила; 2 – полупроводящая нагревательная матрица; 3 – фторополимерная диэлектрическая изоляция; 4 – оплетка из луженой меди; 5 – фторополимерная внешняя оболочка

Для решения задачи были сделаны допущения:

- задача плоская, стационарная;
- движение воздуха – ламинарное;
- не учитывается продольное течение воды в трубе;
- потери в токопроводящих жилах не учитывались;
- теплофизические свойства твердых материалов постоянны.

На границе раздела разнородных сред реализуется условие идеального теплового контакта.

Свойства плотности воздуха и воды задаются линейным законом по двум точкам.

С учетом сделанных допущений система дифференциальных уравнений выглядит следующим образом:

- уравнение энергии:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda_k \frac{\partial t}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial y_i} \left(\lambda_k \frac{\partial t}{\partial y_i} \right) + q_{vk} = 0, \quad (1)$$

$q_{vk} \neq 0$ для нагревательной матрицы кабеля;

- уравнение движения:

$$\rho \theta_j \frac{\partial \theta_i}{\partial x_i} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \frac{\partial \theta_i}{\partial x_j} + f_i, \quad (2)$$

$$f_x = 0; f_y = \frac{g \beta (T - T_0)}{\rho}; f_z = 0.$$

Граничные условия:

Система дифференциальных уравнений дополняется условиями однозначности:

- в начальный момент времени в рассматриваемой области температура принималась равной 0 °С, скорость воздуха – нулю;
- на границе области исследования задавалась температура 0 °С;
- в нагревательной матрице задавался такой тепловой поток, при котором её температура не превышала 120 °С;
- на твердых границах конструктивных элементов задавались условия 4-го рода и равенство температур:

$$\lambda_i \frac{\partial T}{\partial n} \Big| = \lambda_{i-1}, \quad \frac{\partial T}{\partial n} \Big| T_i = T_{i-1}. \quad (3)$$

Система дифференциальных уравнений и граничных условий решалась в инженерном пакете ANSYS методом конечных объемов.

Результаты расчетов. На первом этапе определялась зависимость температуры матрицы и воды в трубе от величины теплового

потока при различной токовой нагрузки в кабеле. Рассматривался кабель конструкции (см. рис. 1, *a*). Мощность кабеля варьировалась от 100 до 140 Вт. Зависимость температур матрицы и воды в трубе от приложенной мощности представлена на рис. 2.

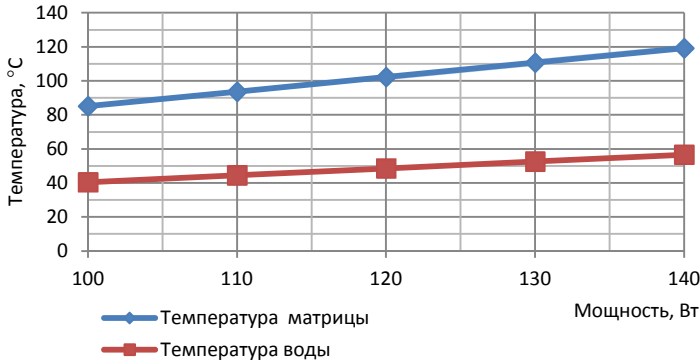


Рис. 2. Зависимость температур матрицы и воды в трубе от приложенной мощности

По полученным результатам можно заметить, что зависимости имеют линейный характер. Так, при изменении мощности на 10 Вт температура на матрице увеличивается на 8 °C, а в воде на 4 °C.

Далее исследовалась зависимость температуры воды в трубе от ширины нагревательной матрицы. Для этого рассматривалась матрица с размерами: 6, 7.2, 8 мм, при этом выделяемая мощность была постоянной, равной 130 Вт. Полученные результаты представлены на рис. 3.

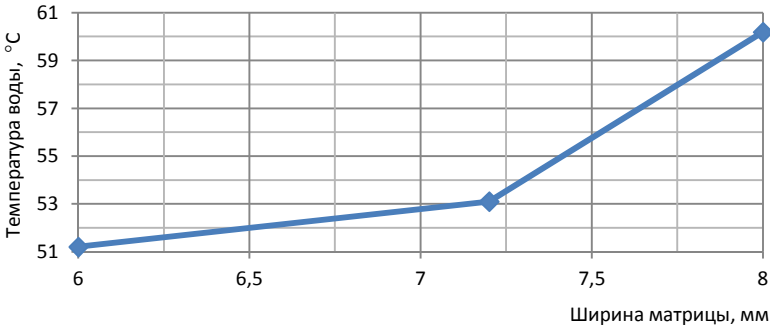
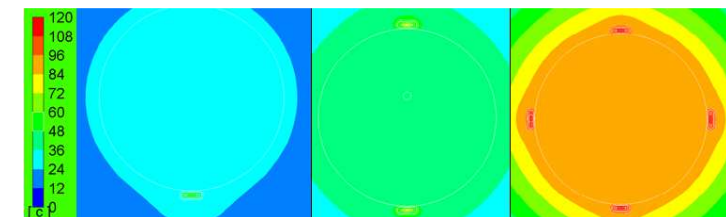


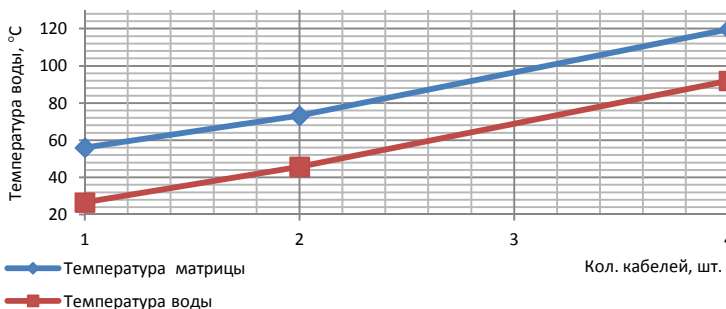
Рис. 3. Зависимость температуры воды в трубе от ширины матрицы

Из результатов экспериментов видно, что с увеличением ширины нагревательной матрицы температура воды возрастает.

На последнем этапе рассматривалось влияние количества греющих кабелей на температурное поле исследуемой области. Было использовано 1, 2, 4 греющих кабеля. Температурные поля для трех вариантов расчета представлены на рис. 4, *а*.



а



б

Рис. 4. Температурные поля, в зависимости от количества нагревательных кабелей (*а*); зависимость температур матрицы и воды в трубе от количества кабелей при одинаковой приложенной мощности (*б*)

По полученным результатам можно сделать вывод, что температура воды и нагревательной матрицы зависит линейно от числа кабелей: использование каждого дополнительного кабеля приводит к увеличению воды на 20 °C.

Таким образом, результаты, полученные в ходе численных экспериментов, позволяют сделать следующие выводы:

1. Температуры нагревательной матрицы и воды прямо пропорциональны приложенной мощности, притом зависимость носит линейный характер.

2. С увеличением размера матрицы труба с водой будет прогреваться эффективнее.

3. Температуры нагревательной матрицы и воды прямо пропорциональны числу греющих кабелей, а зависимость носит линейный характер.

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.

2. Крапивский Е.И., Вишняков И.А. Об особенностях эксплуатации трубопровода, оснащенного системой электроподогрева // ГИАБ. – 2012. – № 7.

3. Геселько А.М., Ушакова И.Г. Проектирование систем водоснабжения и водоотведения в суровых климатических условиях Сибири // Вестник ОмГАУ. – 2015. – № 4(20).

4. Труфанова Н.М., Будаен 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.

Сведения об авторах

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

Фертиков Максим Георгиевич – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КТЭИ-14-16, г. Пермь, e-mail: fertikovmaxsim@gmail.com.

Дятлов Илья Яковлевич – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КТЭ-16-1м, г. Пермь, e-mail: d.i.994@yandex.ru

С.В. Фоминых, С.В. Ершов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВРЕМЕНИ ОКИСЛИТЕЛЬНОЙ ИНДУКЦИИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ ПОЛИЭТИЛЕНА

На современных кабельных заводах для наложения изоляции и оболочек широко применяются полимерные композиции на основе полиолефинов. В данной статье приведены результаты температур и времени окислительных индукций для полимерных композиций на основе полиэтиленов разной плотности. Экспериментальное определение данных параметров производилось методом дифференциальной сканирующей калориметрии на приборе DSCQ2000. В работе представлены графики зависимости теплового потока от времени и температуры.

Ключевые слова: полимерные композиции, полиэтилен, дифференциальная сканирующая калориметрия, окислительная индукция.

S.V. Fominykh, S.V. Ershov

DETERMINATION OF TEMPERATURE AND TIME OF OXIDATIVE INDUCTION OF POLYMER COMPOSITIONS ON THE BASIS OF POLYETHYLENE

At the modern cable plants polymeric compositions on the basis of polyolefins are widely applied to imposing of isolation and envelopes. The article deals with results of temperature and time oxidation induction for polymeric compositions on the basis of polyethylene of different density. The experimental determination of these parameters was made by method of the differential scanning calorimetry on the DSC Q2000 device. In work plots of dependence of a heat flux from time and temperature were constructed.

Keywords: polymer compositions, polyethylene, differential scanning calorimetry, oxidative induction.

При переработке и хранении полимерных материалов, а также при эксплуатации изделий из них полимеры подвергаются воздействию различных факторов – тепла, УФ-излучения (свет), кислорода и др. Эти внешние воздействия приводят к преждевременному старению органических материалов, что может существенно повлиять на их эксплуатационные характеристики или даже привести к разрушению готового изделия. Наиболее распространенной причиной химического старения является окисление. Для оценки устойчивости

полимерных композиций к воздействию кислорода определяют следующие параметры: температура окислительной индукции (ТОИ) и время окислительной индукции (ВОИ) [1].

ТОИ – это относительный показатель сопротивления стабилизированного материала окислительной деструкции, определенный калориметрическим измерением температуры начала экзотермического окисления материала, который нагревается с заданной скоростью в атмосфере воздуха или кислорода.

ВОИ – это условный показатель, характеризующий сопротивление стабилизированного материала окислительной деструкции, определенный калориметрическим измерением временного интервала до начала экзотермического окисления материала при заданной температуре в атмосфере воздуха или кислорода.

Метод, изложенный в ГОСТ [1], заключается в определении времени, в течение которого, или температуры, до достижения которой антиоксидантная стабилизирующая система, присутствующая в материале, препятствует окислению. Время или температура окислительной индукции представляет собой оценку уровня (или степени) стабилизации испытуемого полимера.

Для построения ВОИ и ТОИ исследуемых образцов полимерных композиций использовался дифференциальный сканирующий калориметр DSC Q2000 TA Instruments (рис. 1).



Рис. 1. Дифференциальный сканирующий калориметр DSC Q2000

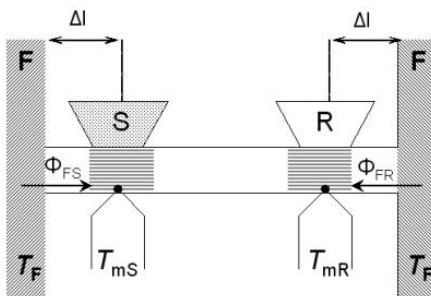


Рис. 2. Схема измерительной камеры ДСК

Данный метод основан на непрерывной регистрации разности теплового потока от образца и эталона или к образцу и эталону (изменения энтальпии) как функции температуры или времени при на-

гревании образцов в соответствии с определенной программой в заданной газовой атмосфере. На рис. 2 представлена схема измерительной камеры ДСК, состоящая из двух ячеек: в одну помещают исследуемый образец (sample, S), а в другую – эталон (reference, R). Для экспериментального определения тепловых эффектов превращения исследуемого материала измеряется разница температур между ячейкой с образцом и ячейкой сравнения.

Экспериментальные исследования производились для трех полимерных композиций на основе полиэтилена низкой (PE 153-10K), средней (Borealis ME6052), и высокой (PE 273-81K) плотности. На первом этапе была определена температура начала процесса окислительной деструкции. Исследуемые образцы помещались в алюминиевые тигли, в качестве эталона в ячейку сравнения помещался такой же пустой тигель. Нагрев производился в атмосфере воздуха (скорость продувки измерительной ячейки 50 мл/мин) от комнатной температуры и продолжался до тех пор, пока температура не окажется на 30°C выше температуры, соответствующей наиболее крутой точке графика. Скорость нагрева составляла 10 °C/мин. На рис. 3 представлены экспериментальные кривые зависимости теплового потока от температуры.

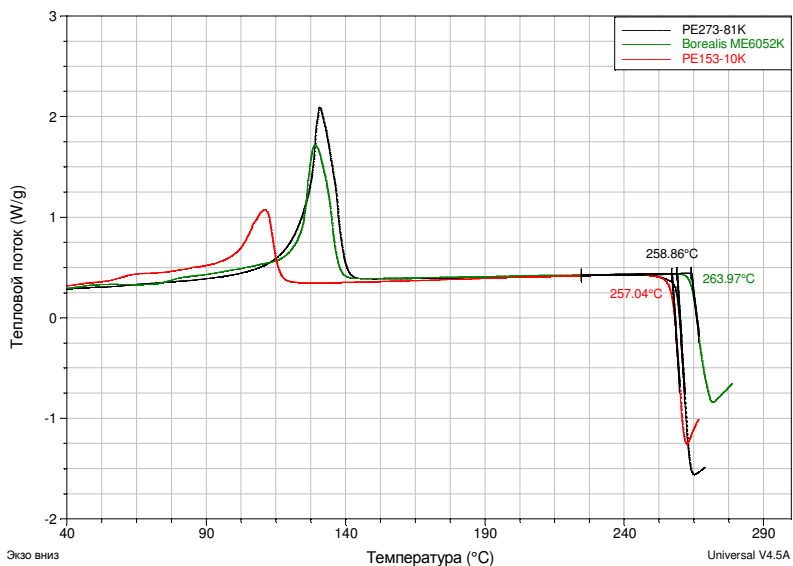


Рис. 3. Зависимости теплового потока от температуры исследуемых полимерных композиций

Анализ полученных зависимостей производился методом касательных. Из данных рисунка видно, что полимерные композиции марок 273-81К и 153-10К отечественного производства имеют близкие значения температуры начала окислительной индукции (около 258 °С) в отличие от полимера марки Borealis ME6052, у которого процесс окисления начинается при достижении температуры 264 °С.

На следующем этапе экспериментальных исследований было определено время окислительной индукции. Для определения температуры изотермического режима использовались данные рис. 3 и рекомендации, изложенные в ГОСТ. Нагрев производился от начальной температуры 50 °С со скоростью 10 °С/мин до достижения температуры испытания. После этого нагрев прекращался, и в течение 3 мин выдерживалась изотерма для достижения равномерной температуры всей камеры ДСК. По истечении указанного времени азот заменялся воздухом. Данный момент отмечался как нулевой. Полученные экспериментальные кривые зависимости теплового потока от времени представлены на рис. 4.

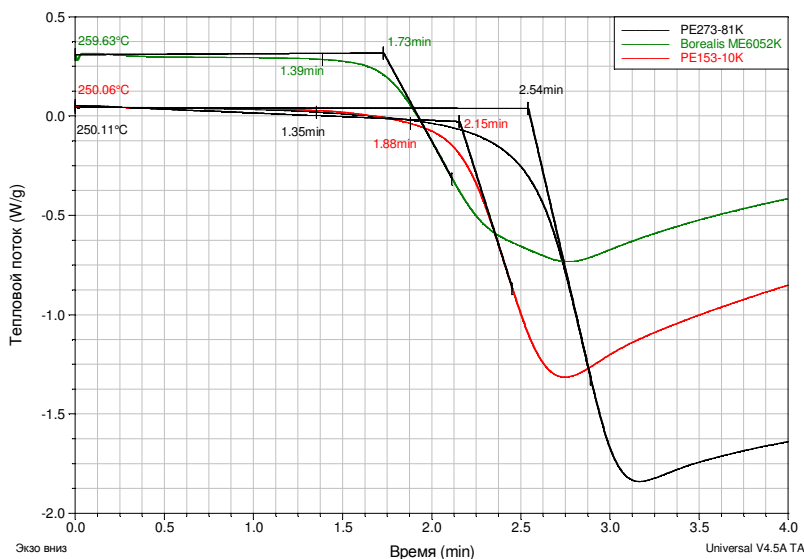


Рис. 4. Зависимости теплового потока от времени исследуемых полимерных композиций

Из полученных данных можно отметить, что полимерная композиция на основе полиэтилена высокой плотности, марки РЕ273-81К имеет самое большое время окислительной индукции (2,54 мин), в то время как в полимере марки МЕ6052 процесс окисления начинается после 1 мин 44 с. При этом стоит отметить, что данный материал имеет большие значения температуры окислительной индукции.

Таким образом, использование данной методики для определения температуры и времени окислительной индукции позволяет произвести сравнительную оценку различных антиоксидантов, входящих в состав полимерных композиций, и подобрать наиболее подходящую.

Библиографический список

1. ГОСТ Р 56756-2015 (ИСО 11357-6:2008). Пластмассы. Дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК). Ч. 6: Определение времени окислительной индукции (изотермическое ВОИ) и температуры окислительной индукции (динамическая ТОИ).
2. Емелина А.Л. Дифференциальная сканирующая калориметрия. – М.: Изд-во Лаборатории хим. фак-та МГУ, 2009. – 42 с.

Сведения об авторах

Фоминых Сергей Викторович – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. МЭ-14-16, г. Пермь, e-mail: quill5953@gmail.com.

Ершов Сергей Викторович – ассистент кафедры «Конструирование и технологии в электротехнике» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: ktei@pstu.ru.

Е.А. Чесноков, В.В. Тиунов

ТЕПЛОВЫЕ НАСОСЫ

В статье описывается производство тепловой энергии с помощью тепловых насосов, когда температура источника теплоты оказывается ниже необходимого уровня. Представлен процесс преобразования энергий, с помощью которого первичную энергию можно превратить в большее количество теплоты при требуемой со стороны потребителя температуре при использовании теплового насоса. Выполнено информационное описание выпускаемых типов тепловых насосов.

Ключевые слова: тепловая энергия, преобразование с помощью тепловых насосов, типы и конструкции насосов.

E.A. Chesnokov, V.V. Tiunov

HEAT PUMPS

In this article the production of the thermal energy with the usage of the **heat pump** is described. The method of the energy conversion is represented, which makes it possible to convert primary energy into the large quantity of heat with the heat pump using, under the temperature required by the consumer. The information description of the output heat pumps is carried out.

Keywords: Thermal energy, energy conversion with the heat pumps usage, types and constructions of the pumps.

Тепловой насос – устройство для переноса тепловой энергии от источника низкопотенциальной тепловой энергии (с низкой температурой) к потребителю (теплоносителю) с более высокой температурой. Работа теплового насоса (ТН) компрессионного типа) (рис. 1), наиболее широко использующегося на практике, состоит в следующем. В испарителе ТН тепло невысокого температурного потенциала отбирается от некоего источника низкопотенциального тепла и передается низкокипящему рабочему телу ТН. Полученный пар сжимается компрессором. При этом температура пара повышается, и тепло на нужном температурном уровне в конденсаторе передается в систему отопления и/или горячего водоснабжения.

Для того чтобы замкнуть цикл, совершаемый рабочим телом, после конденсатора оно дросселируется до начального давления, охлаждаясь до температуры ниже источника низкопотенциального тепла,

и снова подается в испаритель. Таким образом, ТН осуществляет трансформацию тепловой энергии с низкого температурного уровня на более высокий, необходимый потребителю. При этом на привод компрессора затрачивается механическая (электрическая) энергия. При наличии подходящего источника низкопотенциального тепла количество тепла, поставляемого потребителю, может в несколько раз превышать затраты энергии на привод компрессора. Отношение полезного тепла к работе, затрачиваемой на привод компрессора, называют коэффициентом преобразования ТН. При температуре испарителя на уровне $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и температуре конденсатора на уровне $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ коэффициент преобразования «идеального» ТН, работающего по циклу, близкому к циклу Карно, превышает 5. Для реальной установки с учетом существующих потерь он достигает 3. С увеличением температуры источника низкопотенциального тепла и/или с уменьшением температуры, необходимой потребителю, коэффициент преобразования реальной установки возрастает и может достигать больших значений.

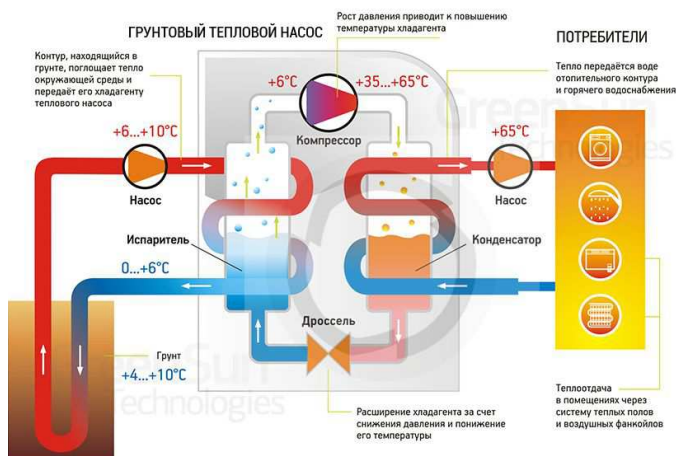


Рис. 1. Схема работы теплового насоса

Использование тепловых насосов в настоящее время. С участием специалистов Института высоких температур РАН (ИВТ РАН) разработан и создан ряд опытно-демонстрационных установок и систем, использующих тепловые насосы для теплоснабжения различных объектов. С 1981 г. на полигоне ИВТ РАН «Солнце» в Дагестане успешно работает система теплоснабжения индивидуального дома

с комбинированным применением теплового насоса и солнечных коллекторов. В качестве источника низкопотенциального тепла используется термальная вода, поступающая из геотермальной скважины глубиной около 60 м с температурой примерно 20°C. В доме применена низкотемпературная напольная система отопления с покомнатным автоматическим регулированием температуры. Солнечная установка с плоскими солнечными коллекторами работает для горячего водоснабжения дома. В Подмоскowie (дер. Грибаново) на территории полигона НПО «Астрофизика» в 2001 г. введена в опытную эксплуатацию солнечно-теплонасосная система теплоснабжения лабораторного здания. В качестве источника низкопотенциального тепла для теплового насоса использован вертикальный грунтовый теплообменник общей длиной около 30 м. Отопительные приборы – фанкойлы и напольный нагреватель. Солнечные коллекторы обеспечивают горячее водоснабжение, избытки солнечного тепла в летнее время закачиваются в грунт для ускоренного восстановления его температурного режима.

Тепловые насосы, выпускающиеся в России

Компания «Smaga». Для геотермальных тепловых насосов используют зонды собственного производства. Срок службы оборудования заявлен в 15–25 лет, продукция соответствует стандартам Евразийского экономического союза. Тепловой насос «TN 10 W220» представлен на рис. 2.



Рис. 2. Тепловой насос «TN 10 W220»

Тепловая мощность в режиме (0w35), кВт: 9,9 электропотребление в режиме (0w35), кВт: 2,59 питание, В: 220, стоимость: 334 458 рублей.

Компания “Корса”. Производитель геотермальных тепловых насосов специализируется на качественном оборудовании, которое комплектуется компрессорами Copeland, отличающимися надежностью и долгим сроком службы. Установки с температурой нагрева воды до 55 и до 65 град. представлены в диапазоне тепловой мощности соответственно 5–110 и 5–55 кВт (рис. 3).



Рис. 3. Тепловой насос компаний Корса

Уральский завод тепловых насосов. Завод является компаньоном компании по производству тепловых насосов, основан в 2011 году. Предприятие занимается сборкой тепловых насосов малой, средней, большой и промышленной мощности. Производительность тепловой энергии оборудования – от 5,5 до 567 кВт. Бивалентный тепловой насос с двухступенчатым отбором тепла «(воздух+DX)-вода». БИТЕН-5 (рис. 4). Стоимость: 386 280 рублей.



Рис. 4. Тепловой насос БИТЕН-5

Тепловые насосы, выпускающиеся за рубежом

Корпорация “Mammoth, Inc”. Mammoth J043H (рис. 5). Охлаждающая мощность – 12,3 кВт, нагревающая мощность – 14,8 кВт, коэффициент эффективности – 4,4.



Рис. 5. Тепловой насос Mammoth J043H

Компания “WESWEN”. Тепловой насос WWHPC08(WWHRPC08) (рис. 6). Охлаждающая мощность (режим кондиционирования)* – 9,2 кВт, нагревательная мощность (режим отопления)** – 9,67 кВт, коэффициент эффективности – 4,69.



Рис. 6. Тепловой насос WWHPC08(WWHRPC08)

Сравнительная таблица затрат стоимости эксплуатационных расходов и стоимости оборудования различных видов отопления. Ниже приведен пример расчета окупаемости теплового насоса. Симплекс мощностью 10 кВт (таблица). Объект расчета – частный дом с потреблением 10 кВт на отопление. В стоимость оборудования включен электродкотел, дизельный котел, котел на сжиженном газе, котел на природном газе/на дровах. Стоимость энергоресурсов указана на ноябрь 2016 года.

Сравнительная таблица затрат

Энергоноситель	Электродкотёл	Дизельное топливо	Сжиженный газ	Тепловой насос	Природный газ (м³)	Дрова (кг)
Кол-во/объем	10 кВт	1 л	1,25 л	2,5 кВт	1,25 м³	3,5 кг
Цена, руб	3,2	36,00	16,50	3,20	4,45	3,00
Стоимость 10 кВт тепла, руб.	32, 00	36,00	20,63	8,00	5,56	10,5
Затраты за сезон (7 мес, 225 сут, 18 ч в сут), руб.	129 600,00	145 800,00	83 511,00	32 400,00	22 518,00	42525,0
Стоимость оборудования, руб.	36 000,00	45 000,00	250 000,00	170 000,00	250 000,00	35000,0
Суммарные затраты за 3 года, руб.	424 800,00	482 000,00	500 533,00	267 200,00	317 554,00	162575,0

Таким образом, проведенный анализ показывает, что использование теплового насоса может составить конкуренцию традиционным видам источников отопления в будущем, однако этот вопрос нуждается в дополнительном изучении и технико-экономическом анализе.

Библиографический список

1. Соренсен Бент. Преобразование, передача и аккумулирование энергий: учебно-справ. руководство. – М.: Интеллект, 2011. – С. 32–36.
2. Попель О.С. Условия эффективного использования и примеры работы тепловых насосов // СОК. – 2004. – № 2.

3. Тепловые насосы российского производства [Электронный ресурс]. – URL: <http://vteple.xyz/teplovyie-nasosyi-rossiyskogo-proizvodstva/#Smaga/>

4. Тепловые насосы Simplex В Перми [Электронный ресурс]. – URL: <http://simplexperm.ru/>

5. Сайт компаний «Weswen» [Электронный ресурс]. – URL: http://weswen.ru/heat_pumps_water_water/heat-pumps-wwhpc08/

Сведения об авторах

Чесноков Евгений Анатольевич – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КТЭ-16-16, г. Пермь, e-mail: e-chesnokov@mail.ru.

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

**Д.А. Чирков, А.Т. Ключников,
А.Д. Коротаев, Э.О. Тимашев**

ВЛИЯНИЕ АКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В ЧАСТОТНО-УПРАВЛЯЕМОМ ЦЛВД

В этом докладе на примере ЦЛВД представлена проблема математического моделирования угловых характеристик низкочастотных синхронных двигателей, в которых активные сопротивления сопоставимы с индуктивными, чем нельзя пренебрегать.

Ключевые слова: угловые характеристики, активное сопротивление, индуктивное сопротивление, цилиндрический линейный вентильный двигатель, синхронный двигатель.

**D.A. Chirkov, A.T. Klyuchnikov,
A.D. Korotaev, E.O. Timashev**

RESISTANCE INFLUENCE IN FREQUENCY-CONTROLLED CLEM

Problem of low frequency synchronous motors angle characteristics mathematical modeling is presented in this report. These motors have active resistances comparable to their inductive resistances, and it shouldn't be ignored.

Keywords: angle characteristics, active resistance, inductive resistance, cylindrical linear electronic motor, synchronous motor.

В работе И.Л. Осина и Ф.М. Юферова отражено влияние активного сопротивления на угловые характеристики синхронных машин с постоянными магнитами [1, с. 128]. Задача же данного исследования – выявить особенности угловых характеристик ЦЛВД, работающего на частотах порядка 1–10 Гц, отчего активное сопротивление двигателя становится больше индуктивного, что расходится с понятием идеализированной электрической машины.

Цилиндрический линейный вентильный двигатель с постоянными магнитами (рис. 1) состоит из цилиндрического корпуса 1, индуктора 3, с трёхфазными обмотками 2, а также вторичного элемента с возможностью возвратно-поступательного движения вдоль корпуса 1, который содержит шток 5, множество постоянных магнитов 6, полюсов 4 и немагнитных вставок 7. Индуктор 3 неподвижно

установлен в корпусе 1 и представляет собой множество катушек образующих трёхфазную обмотку, которая создаёт бегущее магнитное поле вдоль оси корпуса.

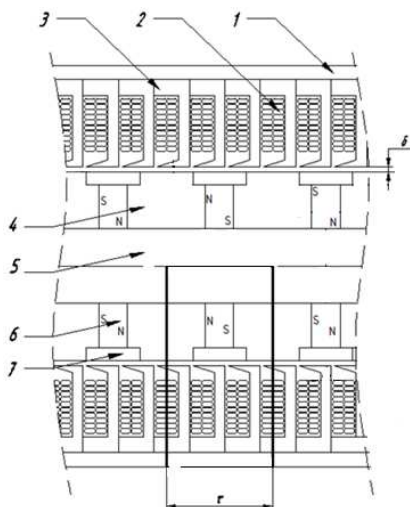


Рис. 1. Разрез модуля ЦЛВД

После проведения расчёта магнитной цепи ЦЛВД и нахождения продольной и поперечной индуктивностей двигателя [2] стало возможным составить математическую модель всего двигателя.

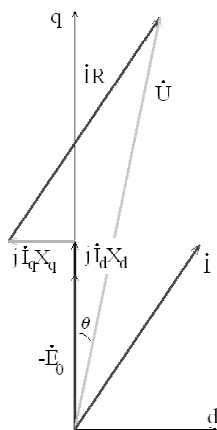


Рис. 2. Векторная диаграмма ЦЛВД

Задаваясь величиной и характером питающего напряжения, а также углом нагрузки θ , можно рассчитать продольную и поперечную составляющие токов статора и полный ток согласно векторной диаграмме, изображённой на рис. 2:

$$I_d = \frac{X_q \cdot (U \cdot \cos(\theta) - E_0) - r_s \cdot U \cdot \sin(\theta)}{X_d \cdot X_q + r_s^2},$$

$$I_q = \frac{r_s \cdot (U \cdot \cos(\theta) - E_0) + X_d \cdot U \cdot \sin(\theta)}{X_d \cdot X_q + r_s^2}, \quad I = \sqrt{I_d^2 + I_q^2}.$$

Преобразовав уравнения нахождения синхронного момента [1, с. 128] для нахождения тягового усилия, получим следующее:

– максимальное основное и реактивное усилия:

$$F_{em} = \frac{U \cdot E_0}{2\tau \cdot f (X_d X_q + r_s^2)^2} \cdot \times$$

$$\times \sqrt{(X_d X_q^2 + 2 \cdot r_s^2 X_d - r_s^2 X_q)^2 + r_s^2 (2 X_q^2 - X_d X_q + r_s^2)^2};$$

$$F_{dqm} = \frac{U^2 \cdot (X_d - X_q)}{4\tau \cdot f (X_d X_q + r_s^2)^2} \cdot \sqrt{(X_d^2 + r_s^2) \cdot (X_q^2 + r_s^2)};$$

– основное и реактивное тормозные усилия:

$$F_{\epsilon T} = -\frac{E_0^2 \cdot r_s}{2\tau \cdot f (X_d X_q + r_s^2)^2} \cdot (X_q^2 + r_s^2),$$

$$F_{dqT} = -\frac{U^2 \cdot r_s}{2\tau \cdot f (X_d X_q + r_s^2)^2} \cdot (X_d - X_q)^2;$$

– углы смещения основного и реактивного усилия:

$$\alpha_{\epsilon} = \arctg \left(\frac{r_s (2 X_q^2 - X_d X_q + r_s^2)}{X_d X_q^2 + 2 \cdot r_s^2 X_d - r_s^2 X_q} \right), \quad \alpha_{dq} = \arctg \left(\frac{r_s (X_d + X_q)}{X_d X_q - r_s^2} \right).$$

В итоге получим значение синхронного усилия:

$$F_C = F_{\epsilon} + F_{dq} = (F_{em} \cdot \sin(\theta + \alpha_{\epsilon}) + F_{\epsilon T}) +$$

$$+ (F_{dqm} \cdot \sin 2(\theta + \alpha_{dq}) + F_{dqT}).$$

Полезная потребляемая мощности рассчитываются по формулам:

$$P_2 = F \cdot v, \quad P_S = P_2 + I^2 \cdot r_s,$$

где v – линейная скорость вторичного элемента, $v = 2\tau \cdot f$; τ – величина полюсного деления, $\tau = 30$ мм; $I^2 \cdot r_s$ – это потери в меди на все три фазы двигателя.

Коэффициент полезного действия и коэффициент мощности:

$$\eta = \frac{P_2}{P_s}, \quad \cos(\phi) = \frac{P_s}{S},$$

где полная мощность $S = U \cdot I$.

Изменяя угол θ , были построены угловые характеристики при частоте 5 Гц (рис. 3).

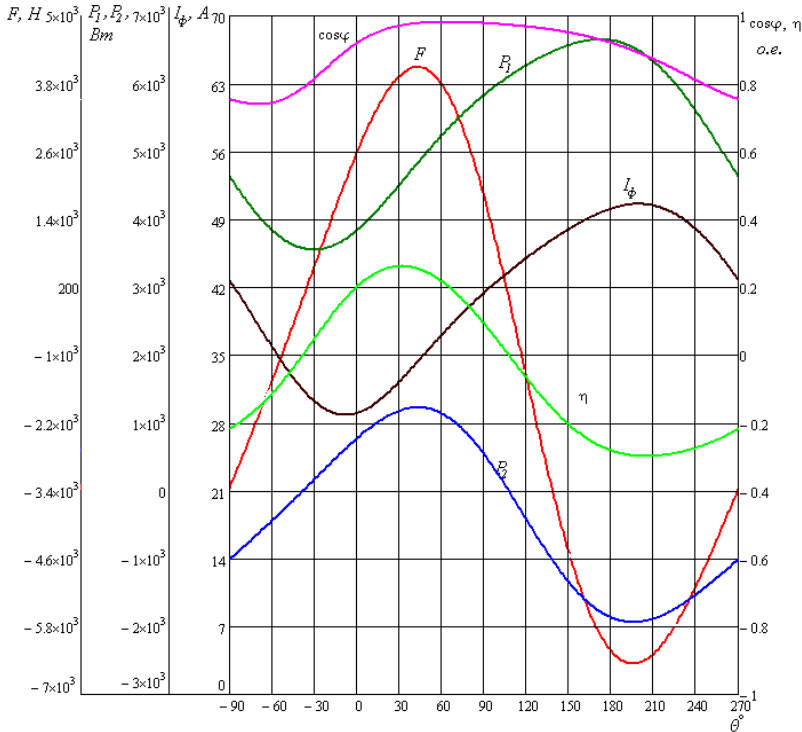


Рис. 3. Угловые характеристики ЦЛВД

На графике видно, что усилие достигает своего максимального значения при угле $\theta = 45^\circ$. Также важно заметить, что коэффициент полезного действия и коэффициент мощности достигают своих наибольших значений приблизительно при том же угле θ .

Также можно заметить, что усилие в отрицательную сторону достигает заметно большей величины. Это происходит потому, что двигатель переходит в генераторный режим, когда реакция якоря

усиливает магнитный поток в воздушном зазоре, а не ослабляет. Действующее значение фазного тока при этом растёт.

Активная потребляемая мощность тоже растёт вместе током, несмотря на то, что полезная мощность становится отрицательной. Смещение максимума усилия на угловой зависимости наглядно продемонстрировано на рис. 4.

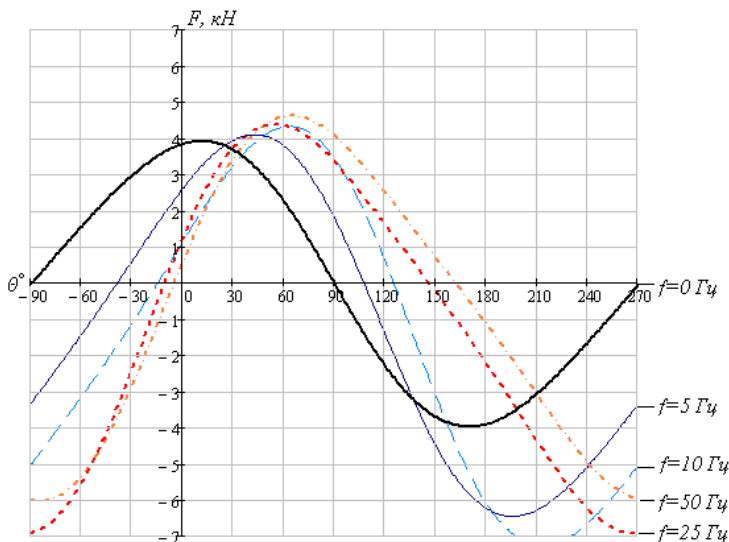


Рис. 4. Угловые зависимости усилия ЦЛВД при разных частотах

При увеличении частоты питающего напряжения от 0 до 50 Гц значение угла θ , соответствующего максимальному усилию двигателя, растёт, начиная от 0 и стремясь к 90° , что соответствует идеализированной синхронной машине, в которой активное сопротивление по сравнению с индуктивным мало, и им пренебрегают.

Библиографический список

1. Осин И.Л., Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических устройств: учеб. пособие для вузов. – М.: Изд-во МЭИ, 2003.
2. Ключников А.Т., Коротаев А.Д., Чирков Д.А. Метод расчета магнитной цепи цилиндрического линейного вентильного двигателя по схеме замещения // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2010. – Т. 14, № 9. – С. 64–69.

Сведения об авторах

Чирков Дмитрий Андреевич – аспирант кафедры «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: chirkov146@mail.ru.

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

Коротаев Александр Дмитриевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: lis@pstu.ru.

Тимашев Эдуард Олегович – докторант Уфимского государственного нефтяного технического университета, г. Уфа.

В.В. Шапошников, А.Д. Коротаев

РАСЧЕТ ТЯГОВОГО УСИЛИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ЛИНЕЙНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

В данной статье рассмотрены устройство и принцип действия цилиндрического линейного асинхронного двигателя. Проведен расчет тягового усилия. Получены зависимости тягового усилия и полезной мощности от скольжения при значениях толщины медного покрытия 0,5, 0,75, 1 мм.

Ключевые слова: цилиндрический линейный асинхронный двигатель, тяговое усилие, скольжение, полюсное деление.

V.V. Shaposhnikov, A.D. Korotaev

MAGNETIC FORCE CALCULATIONS OF CYLINDRICAL LINEAR ASYNCHRONOUS ENGINE

This article describes the design and function of a cylindrical linear asynchronous engine. Traction power calculations were made. Pulling tool dependence and useful power dependence from slipping when the copper coating value is 0,5, 0,75, 1 mm are analyzed.

Keywords: cylindrical linear asynchronous engine, pulling tool, slipping, dependence.

Цилиндрические линейные асинхронные двигатели (ЦЛАД), называемые иногда коаксиальными, могут составлять основу электроприводов возвратно-поступательного движения как альтернативу приводам с механическими преобразователями вида движения. Линейные электроприводы с непосредственной передачей электромагнитного усилия подвижному элементу обладают лучшими регулировочными свойствами, повышенной надежностью, требуют меньших эксплуатационных затрат. ЦЛАД находят применение при создании электроприводов целого ряда производственных механизмов: коммутационной аппаратуры (например, разъединителей в системах электроснабжения метрополитенов); толкателей, используемых в поточных линиях; плунжерных или поршневых насосов, компрессоров; различных манипуляторов и т.п. Указанные возможности линейных электроприводов поддерживают устойчивый интерес к их разработке и исследованию.

В частности, одним из востребованных применений ЦЛАД является использование их в насосных агрегатах для подъема нефти из скважин. В настоящее время для этих целей используются станки-качалки*.

Основными недостатками станков-качалок являются следующие:

- износ насосно-компрессорных труб и штанг, обусловленный трением их поверхностей;
- частые обрывы штанг и малый межремонтный ресурс (300–350 суток);
- низкие регулировочные свойства штанговых насосных агрегатов и связанная с этим необходимость использования нескольких типоразмеров станков-качалок;
- большие габариты и масса станков-качалок и штанг, затрудняющие их транспортировку и монтаж.

Указанные недостатки обуславливают поиск технических решений по созданию бесштанговых глубинно-насосных установок. Одним из таких решений является применение глубинных насосов плунжерного типа с приводом на основе ЦЛАД. В этом случае исключается возможность использования штанги и качалки, предельно упрощается механическая часть. Подачу питания к таким двигателям на глубину 1,5–3,0 км можно осуществить кабелем подобно тому, как это выполнено в электробурах и центробежных погружных насосах.

Устройство и принцип действия цилиндрического линейного асинхронного двигателя. Подавляющее большинство электродвигателей является электродвигателями вращательного движения. В тоже время многие рабочие органы производственных машин должны по технологии своей работы осуществлять поступательное (например, конвейеры, транспортеры и др.) или возвратно-поступательное движение (механизмы подачи станков, манипуляторы, поршневые и другие машины). Рассмотрим устройство и принцип действия цилиндрического линейного асинхронного двигателя.

На рис. 1 представлена типовая конструкция цилиндрического линейного двигателя. Статор двигателя 1 имеет вид трубы, внутри которой располагаются перемежающиеся между собой плоские дисковые катушки 2 (обмотки статора) и металлические шайбы 3, являющиеся частью магнитопровода. Катушки двигателя соединяются

* Вольдек А.И. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом. – Л.: Энергия, 1970. – 272 с.

группами и образуют обмотки отдельных фаз двигателя. Внутри статора помещается вторичный элемент 4 также трубчатой формы, выполненный из ферромагнитного материала.

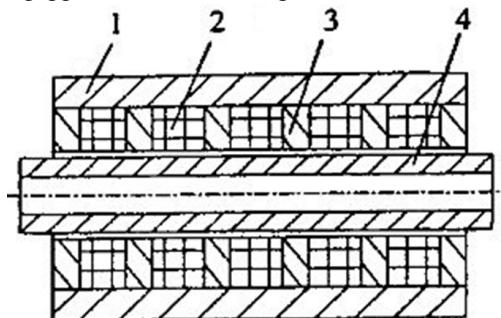


Рис. 1. Цилиндрический (коаксиальный) линейный двигатель

При подключении к сети обмоток статора вдоль его внутренней поверхности образуется бегущее магнитное поле, которое индуцирует в теле вторичного элемента токи, направленные по его окружности. Взаимодействие этих токов с магнитным полем двигателя создает на вторичном элементе силу, действующую вдоль трубы, которая и вызывает (при закрепленном статоре) движение вторичного элемента в этом направлении.

Расчет тягового усилия. Исходные данные указаны в таблице.

Исходные данные

Условные обозначения	Единицы измерения	Значения	Примечание
D_p	м	0,055	Диаметр ротора
I	А	30	Ток в сети
τ	м	0,03	Полусное деление
δ	м	0,0015	Ширина немагнитного зазора
Δ	м	0,0005	Толщина медного покрытия
W_n		20	Число витков в пазу
m		3	Число фаз
p		16	Число пар полюсов
n		32	Число катушек в фазе
μ_0	Гн/м	$12,56 \cdot 10^{-7}$	Магнитная проницаемость
γ_m	См/м	$0,58 \cdot 10^8$	Проводимость меди
f	Гц	50	Частота сети
S		$1 \div 0,1$	Скольжение

Тяговое усилие

$$F_{\text{эм}} = \frac{a \cdot \delta \cdot 2 \cdot p \cdot \tau}{2} \cdot \frac{\mu_0 \cdot J_{1m}^2}{\alpha} \cdot \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon^2}. \quad (1)$$

Циклическая частота

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f. \quad (2)$$

Число витков в фазе

$$W_{\phi} = W_{\text{п}} \cdot n. \quad (3)$$

Ширина двигателя

$$a = \pi(D_p + \delta). \quad (4)$$

Коэффициент полюсного деления

$$\alpha = \frac{\pi}{\tau}. \quad (5)$$

Эквивалентная электропроводность

$$\gamma = \frac{Y_M \cdot \Delta}{\delta}. \quad (6)$$

Плотность тока в первичной обмотке

$$J_{1m} = \frac{W_{\phi} \cdot m \cdot I \cdot \sqrt{2}}{2 \cdot p \cdot \tau \cdot \delta}. \quad (7)$$

Магнитное число Рельнодса

$$\varepsilon = \frac{\mu_0 \cdot \gamma \cdot \omega}{\alpha^2}. \quad (8)$$

Скорость движения магнитного поля

$$v_0 = 2 \cdot \tau \cdot f. \quad (9)$$

Скорость движения вторичного элемента

$$v = v_0 \cdot (1 - S). \quad (10)$$

Полезная мощность

$$P_2 = F_{\text{эм}} \cdot v. \quad (11)$$

Полученные зависимости тягового усилия и полезной мощности от скольжения представлены на рис. 2.

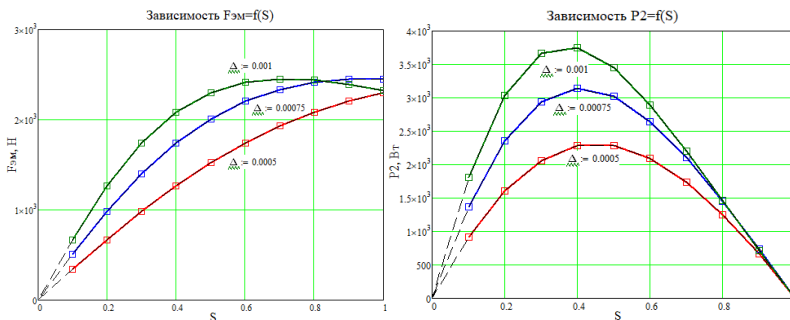


Рис. 2. Зависимости тягового усилия

Заключение. Проведя расчеты, сделали вывод, что двигатель должен работать в диапазоне скольжений от 0,9 до 1 для получения скоростей в пределах от 0,1 до 0,3 м/с, при этом значение тягового усилия будет от 220 до 240 кг/с. Большие значения скольжения приводят к уменьшению КПД, к увеличению потерь, следовательно, к дополнительному нагреву двигателя. Использовать данный цилиндрический линейный асинхронный двигатель вполне возможно, но целесообразнее использовать синхронный или вентильный двигатель, у которых скольжение нулю.

Сведения об авторах

Шапошников Владислав Валерьевич – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ЭМ-14-1пб, г. Пермь, e-mail: vladislav96gg@gmail.com.

Коротаяев Александр Дмитриевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь.

К.В. Бородулина, Н.М. Труфанова, И.Я. Дятлов

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПРОВОДОВ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ОТ ПАРАМЕТРОВ РАСЩЕПЛЕНИЯ

В этой статье с помощью математического моделирования была исследована зависимость напряженности электрического поля на проводах воздушной линии 500 кВ от диаметра расщепления фазы и от числа проводов при фиксированном сечении фазы. Кроме этого была проведена оценка влияния соседних фаз на напряженность электрического поля.

Математическое моделирование производилось с использованием метода конечных элементов в среде Ansoft Maxwell.

В ходе работы были получены распределения электрического поля, построены графические зависимости напряженности поля у поверхности проводника в зависимости от диаметра расщепления фазы и от числа проводов при фиксированном сечении фазы.

Ключевые слова: напряженность электрического поля, высоковольтная воздушная линия, расщепление фазы, математическое моделирование.

K.V. Borodulina, N.M. Trufanova, I.Ya. Djatlov

NUMERICAL ANALYSIS OF ELECTRIC FIELD STRENGTH DEPENDENCE ON AIR LINE WIRES FROM SPLIT PARAMETERS

In this paper, using mathematical modeling, the dependence of the electric field strength on the 500 kV air-line wires on the phase splitting diameter and on the number of wires at a fixed phase cross section was investigated. In addition, the effect of neighboring phases on the strength of the electric field was evaluated.

Mathematical modeling was performed using the finite element method in Ansoft Maxwell.

In the course of the work, electric field distributions were obtained, graphical dependences of the field strength at the conductor surface were plotted as a function of the phase splitting diameter and the number of wires for a fixed phase cross section.

Keywords: electric field strength, high-voltage airline, phase splitting, mathematical modeling.

В источнике [1] приведена разработка методики построения распределения напряженности электрического поля вдоль ВЛЭП с одновременным учетом рельефа местности и температуры окружающей

среды. Решение по представленной методике предлагается производить с помощью метода конечных элементов в пакете Ansys.

Работа [2] представляет новый подход к применению метода конечных объемов для расчета электрического поля в пространственно-неоднородной трехмерной среде. Формулируется задача Дирихле с построением расчетной сетки на основе разбиения пространства, с применением в расчетной схеме ячеек Вороного. Приводится численный алгоритм для расчета потенциала и напряженности электрического поля в пространстве в окрестности опоры линии электропередачи. Предложен алгоритм численного счета в среде MatLab.

В работе [3] приведены методы построения распределения напряженности электрического поля вдоль воздушной линии электропередачи напряжением 500 кВ.

Задача расчета электрического поля линии электропередач со сближенными фазами рассматривается в исследовании [4].

В работе [5] рассматривается метод изображений, приводятся его суть, пример расчета и сравнение его с численной моделью.

В статье [6] рассмотрены вопросы моделирования электромагнитной обстановки на трассах многофазных линий электропередачи. На основе предлагаемой методики путем ограниченного перебора вариантов фазировки проводов ЛЭП может быть решена сложная задача выбора оптимального расположения проводов отдельных фаз многофазной линии.

Объектом исследования являлись провода типа АС [7], расположенные на опоре, как в работе [8].

Предметом исследования является электрическое поле фазы воздушной линии.

Цель работы – исследование зависимости напряженности электрического поля от различных параметров.

Задачи:

- 1) найти и оценить зависимость напряженности электрического поля фазы от диаметра расщепления;
- 2) найти и оценить зависимость напряженности электрического поля фазы от числа проводов при фиксированных сечениях фазы.

В работе использовался провод АС с параметрами, указанными в табл. 1.

Таблица 1

Параметры исследуемых проводов АС

Маркоразмер	Количество проволок, шт		Диаметр алюминиевых проволок, мм	Диаметр стальных проволок, мм
	Алюминий	Сталь		
АС 200(11)	18	1	3,76	3,76
АС 240(32)	24	7	3,6	2,4
АС 330(43)	54	7	2,80	2,80
АС 400(51)	54	7	3,05	3,05
АС 500(64)	54	7	3,40	3,40
АС 600(72)	54	19	3,7	2,2
АС 650(79)	96	19	2,9	2,3
АС 750(51)	96	19	3,15	2,5
АС 1000(43)	72	7	4,21	2,8

Для оценки влияния диаметра расщепления на напряженность электрического поля была рассмотрена одна фаза, расщепленная на 5 проводов АС 400(54). Число и сечение проводов оставались постоянными, изменялось расстояние между ними. Решалась двумерная электростатическая задача. Результаты расчетов представлены на рис. 1.

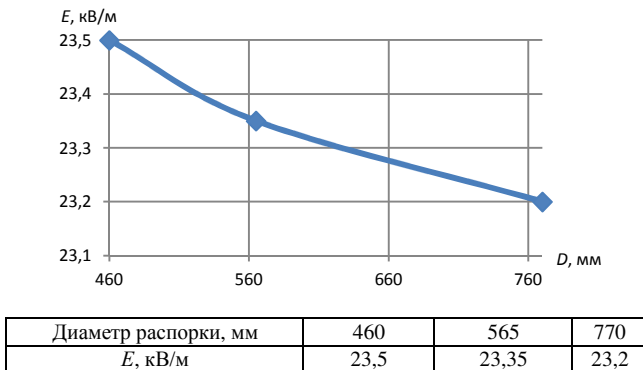


Рис. 1. Зависимость напряженности электрического поля от диаметра расщепления

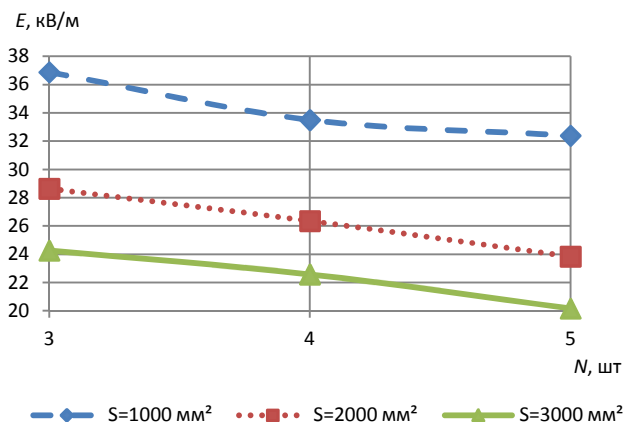
Как видно из результатов (рис. 1), напряженность с изменением диаметра распорки меняется незначительно. С увеличением диаметра от 460 до 565 мм напряженность изменилась на 0,6 %, а с увеличением диаметра от 460 до 770 мм напряженность снизилась на 1,2 %. Следовательно, изменять напряженность варьированием диаметра распорки нецелесообразно.

Далее рассмотрим зависимость напряженности электрического поля от числа проводов при фиксированных сечениях фазы (табл. 2). Для этого рассмотрим площади фазы 1000, 2000 и 3000 мм². Данные сечения составлены из стандартных размеров проводов (табл. 2).

Таблица 2

Зависимость напряженности электрического поля от сечения фазы

Сечение, мм ²	Количество и сечение проводов в фазе, шт. × мм ²	Тип провода	E , кВ/м
1000	3×330	АС 330(43)	36,88
	4×240	АС 240(32)	33,5
	5×200	АС 200(11)	32,39
2000	3×650	АС 650(79)	28,64
	4×500	АС 500(64)	26,36
	5×400	АС 400(51)	23,84
3000	3×1000	АС 1000(43)	24,26
	4×750	АС 750(51)	22,57
	5×600	АС 600(72)	20,16



a

Рис. 2. Зависимость напряженности электрического поля от:

a – количества проводов, *б* – сечения фазы

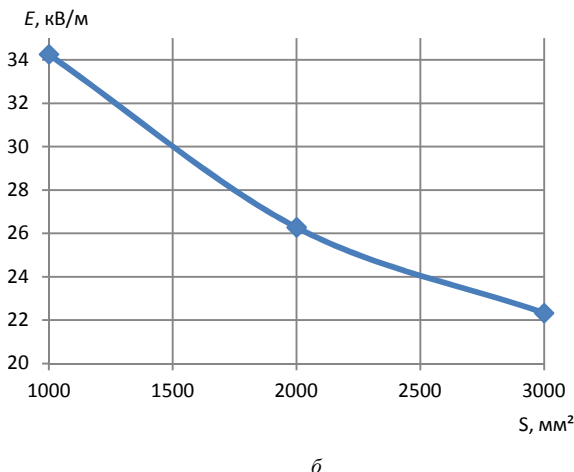


Рис. 2. Окончание

По полученным результатам (рис. 2, б) можно заключить, что изменение сечения проводника значительно влияет на напряженность. Если сравнить сечение 1000 и 2000 мм², то величина напряженности уменьшилась в среднем на 22 %, а при увеличении сечения с 1000 до 3000 мм² напряженность упала на 35 %. Следовательно, наибольший эффект снижения напряженности дает увеличение площади сечения проводов фазы с 1000 до 2000 мм².

В случае разбиения фазы фиксированного сечения на 3, 4 и 5 проводов (рис. 2, а) напряженность уменьшилась на 8 % при увеличении числа проводов с 3 до 4, при изменении количества проводов в фазе с 3 до 5 – напряженность снизилась на 15 %.

Закключение

1. Изменение диаметра распорки расщепления в целях снижения напряженности не эффективно.

2. Изменение напряженности от числа проводов расщепления носит линейный характер. При увеличении числа проводов в расщеплении на 1 шт. напряженность снижается в среднем на 8 %.

3. Зависимость напряженности от площади сечения проводов в фазе носит нелинейный характер. Наибольший эффект снижения напряженности дает увеличение площади сечения проводов фазы с 1000 до 2000 мм².

Библиографический список

1. Сидоров А.И., Таваров С.Ш. Построение карты напряженности электрического поля с учетом рельефа и температуры воздуха // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. – 2013. – Т. 13, № 1.
2. Пацюк В.И. Распределение потенциала в окрестности опоры линии электропередачи // Problemele energeticii regionale. – 2013. – № 3.
3. Таваров С.Ш. О методике построения карты напряженности электрического поля вдоль ВЛЭП 500 кВ // Вестник ЮУрГУ. – 2012. – № 37.
4. Расчет электрического поля и параметров линии управляемых самокомпенсирующихся высоковольтных линий 110 кВ методом конечных объемов / В.И. Пацюк, В.П. Берзан, Г.М. Рыбакова, В.К. Анисимов // Problemele energeticii regionale. – 2013. – № 23.
5. Быковская Л.В., Чурикова Е.В. Моделирование электрического и магнитного полей воздушной линии электропередачи // Вестник Кузбас. гос. техн. ун-та. – 2016. – № 5.
6. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Лэ Ван Тхао. Моделирование электромагнитной обстановки на трассах многофазных линий электропередачи // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2016. – № 52.
7. ГОСТ 839-80. Провода неизолированные для воздушных линий электропередачи.
8. Труфанова Н.М., Бородулина К.В., Дятлов И.Я. Исследование напряженности электрического поля проводов воздушной линии 500 кВ // Электротехника. – 2017. – № 11.

Сведения об авторах

Бородулина Ксения Владиславовна – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КТЭ-16-1м, г. Пермь, e-mail: kseniya_borodulina@mail.ru.

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

Дятлов Илья Яковлевич – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КТЭ-16-1м, г. Пермь, e-mail: d.i.994@yandex.ru.

З.Ф. Валинурова, Т.В. Костыгова

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ЭМАЛИРОВАНИЯ ПРОВОЛОКИ НА ВЕРТИКАЛЬНОМ ЭМАЛЬ-АГРЕГАТЕ

В современном мире наиболее активно развивается кабельное производство, в частности производство обмоточных проводов с эмалевой изоляцией. Эмалированные провода используют при изготовлении различных обмоток электрических машин. Эмалевая изоляция обладает лучшими электроизоляционными свойствами. В ходе технологического процесса можно получить провод с диаметрами 0,012–3 мм. В данной работе были проведены расчеты оптимальной скорости эмалирования провода диаметром 1,25 мм с учётом изменения температуры в эмаль-печи и скорости воздушного потока на входе в эмаль-печь.

Ключевые слова: эмалирование, температура, скорость, эмаль-печь, катализатор.

Z.F. Valinurova, T.V. Kostygova

INVESTIGATION OF THE THERMAL PROCESSES OF WIRE ENAMELING ON A VERTICAL ENAMEL AGGREGATE

In the modern world, the most active development of cable products, in particular, the production of winding wires with enamel insulation. Enamelled wires are used in the manufacture of various windings of electrical machines. Enamelled insulation has better electrical insulation properties. During the process, a wire with a diameter of 0,012-3 mm can be obtained. In this work the calculation of the optimum rolling speed of enamel with a diameter of 1,25 mm was made taking into account the temperature change in the enamel furnace and the air flow at the entrance to the enamel furnace.

Keywords: enameling, temperature, speed, enamel-furnace, catalyst.

Развитие электрического оборудования зависит от производства обмоточных проводов, в том числе и эмалированных проводов, поскольку провода с эмалевой изоляцией являются наиболее прогрессивной группой. Процесс эмалирования является ключевым, так как от него зависят качество и надежность проводов [1]. Рассмотрим его подробнее.

Эмалирования проволоки – это нанесение на поверхность проволоки жидкого лака с последующей тепловой обработкой в эмали-печи, где в результате образуется изоляционное покрытие.

Качество данного покрытия зависит от состояния поверхности эмалируемой проволоки, от типа лака, его физико-химических свойств, от способа нанесения лака, его тепловой обработки [2]. Технологический процесс эмалирования проводится на эмали-агрегате и состоит из следующих операций: с отдающей катушки проволока проходит через печь отжига, волочильную приставку, снова через печь отжига, затем через лакононосящий узел и далее движется в эмали-печь, где происходит термообработка провода. На выходе из печи проволока имеет уже полимерное сформированное покрытие. Проволока проходит через эмали-печь несколько раз до получения требуемой толщины покрытия. Готовый провод поступает на приемную катушку.

Эмали-агрегаты по конструктивному исполнению могут иметь как горизонтальное, так и вертикальное расположение эмали-печей. В отечественной практике на станках с горизонтальным расположением эмали-печей эмалируется проволока диаметром 0,02–0,09 мм, на станках с вертикальным расположением печей – круглая диаметром свыше 0,09 мм и проволока прямоугольного сечения [3].

В данной работе объектом исследования является эмали-агрегат MATE SV70-224/2 с вертикальным расположением печей и предназначен для эмалирования круглых медных проводов диаметром от 0,70 до 2,24 мм. Устройство печи имеет две зоны: в первой зоне идет удаление растворителя, во второй зоне идет процесс образования изоляционного покрытия. Скорость эмалирования зависит от температуры в эмали-печи и скорости воздушных потоков.

Проведен расчет оптимальной скорости эмалирования провода диаметром 1,25 мм в зависимости от температуры катализатора в эмали-печи. График зависимости температуры термопары внутри эмали-печи агрегата MATE SV70-224/2 при изменении температуры катализатора приведен на рис. 1.

Расчет скорости эмалирования проведен с помощью программы Pascal. Зависимость скорости эмалирования при изменении температуры на катализаторе приведена на рис. 2.

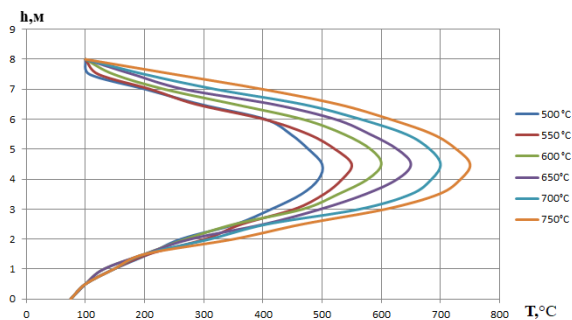


Рис. 1. Распределение температуры термопары в эмаль-печи при изменении температуры на катализаторе от 500 до 750 $^\circ\text{C}$

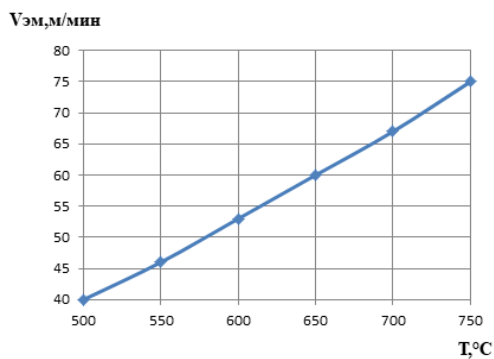


Рис. 2. Зависимость скорости эмалирования от температуры на катализаторе

Результаты расчета скорости эмалирования в зависимости от скорости воздушного потока в начале эмаль-печи приведены в таблице и на рис. 3.

Зависимость скорости эмалирования
от скорости воздушного потока в печи

V_0	$V_{\text{эм}}, \text{м/мин}$
0,5	61
0,8	66
1	70
1,3	75
1,5	78
2	84
2,5	89

$V_{эм}, м/мин$

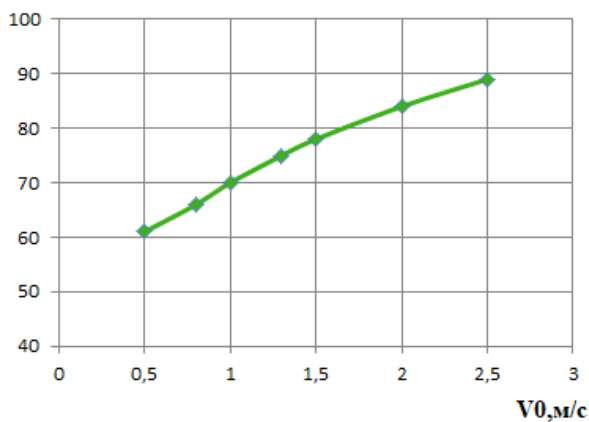


Рис. 3. Зависимость скорости эмалирования от скорости воздушного потока в эмаль-печи

$V_{эм}, м/мин$

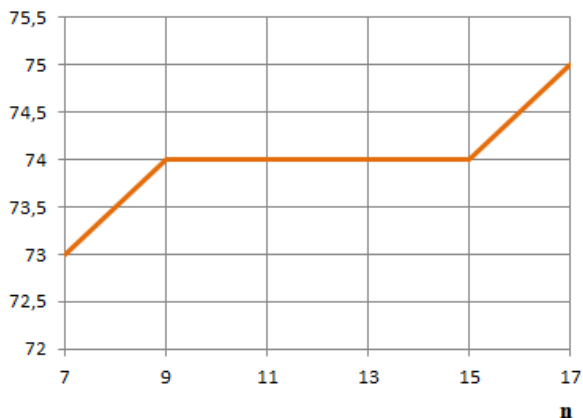


Рис. 4. Зависимость скорости эмалирования от числа проходов на эмаль-агрегате МАТЕ SV70-224/2 для проволоки диаметром 1,25 мм

Лак на провод наносится за несколько проходов. В последнее время наблюдается тенденция к увеличению числа проходов, т.е. к уменьшению толщины изоляции, наносимой за один проход. Влияние количества проходов на скорость эмалирования на эмальагрегате

МАТЕ SV70-224/2 для провода диаметром 1,25 мм при $T_k = 750$ °C приведена на рис. 4.

Заключение

1. При увеличении температуры на катализаторе скорость эмалирования возрастает, поскольку процессы удаления растворителя и плёнообразования проходят быстрее.

2. С возрастанием скорости воздушного потока в первой зоне эмали-печи наблюдаем увеличение скорости эмалирования ввиду более интенсивного теплообмена.

3. С изменением числа проходов наблюдается незначительное изменение скорости эмалирования, так как толщина одного слоя изоляции меняется на несколько микрон.

Библиографический список

1. Пивенко В. Производство эмалированных проводов – важнейший сектор производства кабельных изделий // Кабельные провода. – 1999. – № 2(257).

2. Костыгова Т.В. Технология производства проводов. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2010. – 69 с.

3. Большая энциклопедия нефти и газа. Процесс эмалирования [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.ngpedia.ru/id344385p1.html> (дата обращения: 23.05.2018).

Сведения об авторах

Костыгова Татьяна Васильевна – доцент кафедры «Конструирование и технологии в электротехнике» Пермского национального исследовательского политехнического университета, Пермь, e-mail: 2391854@mail.ru.

Валинурова Зарина Фагилевна – студентка Пермского национального исследовательского политехнического университета, Пермь, e-mail: zarina.valinurova@mail.ru.

Я.А. Гасанова, В.В. Черняев

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КЦ ГКС-3

В данной статье рассмотрено электроснабжение компрессорного цеха № 5 Горнозаводского ЛПУ МГ. Актуальность данной статьи имеет большое значение в производственной деятельности Горнозаводского ЛПУ МГ. В статье приведены расчеты токов уставок времени работы защиты закрытого распределительного устройства 10 кВ.

Ключевые слова: электроснабжение, ток, компрессорный цех.

Ya.A. Gasanova, V.V. Chernyaev

CALCULATION OF POWER SUPPLY CC GKS-3

In this article, the power supply of the compressor shop No. 5 of the Gornozavodsky LPU MG is considered. The relevance of this article is of great importance in the production activities of the Gornozavodsky LPU MG. The article presents calculations of the currents of the operating time settings for the protection of the closed switchgear 10 kV.

Keywords: Power supply, current, compressor shop.

Электроэнергия – равноправный компонент производственного процесса, а значит, правильно спроектированное электроснабжение промышленного предприятия способно существенным образом оптимизировать издержки и в результате сократить себестоимость продукции.

Повышения эффективности и надежности электроснабжения невозможно достичь без тщательного анализа установленных потребителей, а также режимов их функционирования.

Динамичность технологических процессов и закономерное совершенствование производства требуют от системы электроснабжения современных предприятий гибкости, простоты и надежности. При этом промышленные объекты различных отраслей хозяйства имеют свои, зачастую уникальные требования к проектированию каналов электроснабжения.

Основные энергетические установки компрессорного цеха № 5 Горнозаводского ЛПУ МГ снабжаются электроэнергией посредством двух 10 кВ фидеров от разных секций закрытого распределительного

устройства (ЗРУ) 10 кВ, которое, в свою очередь, запитано от подстанции 110/10 кВ «Горнозаводская». В таблице представлены характеристики основного оборудования ЗРУ-10кВ.

Характеристика основного оборудования ЗРУ-10кВ

№ п/п	Элемент оборудования	Технические параметры	Примечание
1	Выключатель масляный RMS	$U_n = 10$ Кв; $\max = 12$ кВ; $I_{ном} = 630$ А; $t_{откл} = 0,05$ с; $t_{вкл} = 0,075$ с	Фирма SACE L17-0/4R
2	Трансформатор тока ICR	$I_n = 630$ А; $K_{тт} = 600/1,5$ А; $P = 5/10; 15/30$ ВА	Возможность изменения $R_{тт}$
3	Трансформатор напряжения TPM GF	$I_n = 6,3$ А; $U_{max} = 12$ кВ	
4	Разрядник ХВО 10	$U_{ср} = 2...36$ кВ	Сигнализация срабатывания
5	Реле максимального тока с независимой выдержкой времени PAKS-3310	$U = 48$ В; $I_n = 0,1...1,6$ А; диапазон выдержки времени $1...16$ с	Регулируемые элементы – коди- рующие диски (16+10 дисков)
6	Реле напряжения с независимой выдержкой времени RVS 3115	$U = 50...240$ В; $t = 0,1...0,2$ с. Выходное реле 250 В 5 А	
7	Реле максимального напряжения нулевой последовательности RMVN 3110	$U_{перер} = 140$ В; $U_p = 48$ В; $U_{изм} = 70 \text{ В}/\sqrt{3} - 70 \text{ В}/\sqrt{3}$ $T = 0,04...0,6$ с	Защита от неполнофазного режима
8	Реле частоты RFS 2110-2120	$U_2 = 100$ В; $U_p = 48$ В	

Для понижающих трансформаторов 10/0,4 кВ уставка токовой отсечки I_{co} должна удовлетворять следующим условиям:

1) $I_{co} \geq I_k \cdot K_n$, где I_k – ток короткого замыкания, K_n – коэффициент надёжности.

При питании от генератора $I_{co} \geq 1,3 \cdot 9,93$.

2) $I_{co} \geq K_n \cdot I_{ном. тр}$, где $I_{ном. тр}$ – номинальный ток трансформатора

При питании от сети $I_{co} \geq 1,4 \cdot 1156$ А.

Принимаем $I_{co} = 1,3 \cdot 9,93 = 12,909$ кА.

$$I_{ср.р} = 9,93 \cdot 3,46 = 34,4 \text{ А},$$

где $I_{ср.р}$ – ток срабатывания реле при установленном токе, K_n – коэффициент чувствительности.

Чувствительность отсечки при максимальном токе 2-фазном коротком замыкании:

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{кmax}}}{I_{\text{сз}}} = \frac{0,867 \cdot 970}{34,4 \cdot 15} = 1,63 > 1,2,$$

где $n_{\text{т}} = 75/5 = 15$ – коэффициент трансформации, $I_{\text{ном}} = 970$ А – номинальный ток вторичной обмотки трансформатора.

Уставки комплектной трансформаторной подстанции (КТП) производственно-энергетического блока и КТП аппаратов воздушного охлаждения (АВО-газ) как максимальной токовой защиты (МТЗ), так и токовой отсечки будут одинаковы, так как одинаковы расчётные условия выбора уставок (одинаковые мощность трансформатора и $I_{\text{кmax}}$).

На секционном выключателе ЗРУ-10кВ установлена МТЗ в трёхфазном исполнении ($n_{\text{т}} = 250/5$). Ток срабатывания защиты $I_{\text{сз}}$ выбирается из условия согласования с защитой отходящих линий

$$I_{\text{сз}} = K_{\text{нс}} \cdot I_{\text{сз.пред}} = 1,2 \cdot 105 = 126 \text{ А},$$

где $I_{\text{сз.пред}}$ – это ток срабатывания защиты на предупреждение, $K_{\text{нс}}$ – коэффициент согласования

Время срабатывания защиты принимаем по условию согласования с $t_{\text{МТЗ}}$ отходящих линий:

$$t'_{\text{сз.св}} = t_{\text{сз.КТП}} + \Delta t = 0,3 + 0,3 = 0,66 \text{ с},$$

где $t_{\text{сз.КТП}}$ – это время срабатывания защиты, Δt – задержка по времени.

Чувствительность отсечки на секционном выключателе ЗРУ выбираем по условию согласования с временем МТЗ отходящих линий:

$$K_{\text{ч}} = 0,87 \cdot I_{\text{к max}} / I_{\text{сз}} > 1,2.$$

На питающем вводе ЗРУ-10кВ установлена МТЗ в трёхфазном исполнении с пуском по напряжению, токовая отсечка и земляная защита ($n_{\text{т}} = 400/5$).

Ток срабатывания МТЗ выбирается из условия согласования с защитой секционного выключателя

$$I_{\text{сз}} = K_{\text{н.с}} \cdot I_{\text{сз.св}} = 1,25 \cdot 126 = 157,5 \text{ А},$$

$$I_{\text{ср.п}} = 0,87 \cdot 157,5/80 = 1,71 \text{ А},$$

где $n_{\text{т}} = 400/5 = 80$ – коэффициент трансформации.

Время срабатывания $t_{\text{сз.св}} = t'_{\text{сз.св}} + \Delta t = 0,66 + 0,3 = 0,96 \text{ с}.$

Чувствительность срабатывания МТЗ выбирается из условий согласования с защитой секционного выключателя на питающем вводе ЗРУ:

$$K_{\text{ч}} = 0,87 \cdot I_{\text{к}} / I_{\text{сз}} = 0,87 \cdot 970 / 157,5 > 1,5.$$

Для обеспечения селективности с МТЗ, установленной на подстанции 110/10 кВ фидера э/сн ЗРУ-10кВ принимаем:

$$I_{сз} = 157,5 \cdot 1,2 = 189 \text{ А.}$$

Ток срабатывания отсечки

$$I_{со} = 12,909 \cdot 1,2 = 15,5 \text{ кА.}$$

$$I_{ср.р} = 12,909 \cdot 3,46 = 44,6 \text{ А.}$$

$$I_{сз} = I_{сз} \cdot 1,2 = 226,8 \text{ А.}$$

Чувствительность отсечки при $I_{к\max}$

$$K_{\eta} = 0,87 \cdot 970 / 226,8 = 1,62 > 1,2.$$

Таким образом, в статье приведены расчеты уставки защит с выдержкой времени для селективности и корректной работы ЗРУ с подстанцией 110/10 кВ «Горнозаводская», что обеспечивает надёжность электроснабжения компрессорной станции.

Библиографический список

1. Меньшов Б.Г., Беляев А.В., Ящерицын В.Н. Электроснабжение газотурбинных компрессорных станций. – М.: Недра, 1985.
2. Фёдоров В.А. Библия релейной защиты и автоматики. – Новосибирск, 2004.
3. Инструкция по ЗРУ-10кВ 110-04-1400 СОЭГ 1983.

Сведения об авторах

Гасанова Яна Арзусевна – студентка Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. МЭ-14-1б, г. Пермь, e-mail: yanagasanova96@mail.ru.

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

В.А. Готовцева, Г.И. Бабокин

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СКРЕБКОВОГО КОНВЕЙЕРА С БЕЗРЕДУКТОРНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Применение безредукторного привода скребкового конвейера повышает его коэффициент полезного действия, снижает затраты на техническое обслуживание и ремонт привода. Разработана четырехмассовая математическая модель электромеханической системы конвейера СП250 с синхронным двигателем с постоянными магнитами. Модель отличается учетом изменения жесткости рабочего участка тяговой цепи конвейера и положения сосредоточенной массы транспортируемого груза в зависимости от расположения очистного комбайна в лаве.

Ключевые слова: математическая модель, скребковый конвейер, безредукторный привод, синхронный двигатель с постоянными магнитами.

V.A. Gotovtseva, G.I. Babokin

MATHEMATICAL MODEL OF THE SCRAPER CONVEYOR WITH GEARLESS ELECTRIC DRIVE

The use of a direct drive scraper conveyor increases its efficiency, reduces the cost of maintenance and repair of the drive. A four-mass mathematical model of the electromechanical system of the conveyor SP250 with a synchronous motor with permanent magnets is developed. The model is subject to change the rigidity of the working section of the traction chain of the conveyor and position of the concentrated mass of the transported cargo, depending on the location of the shearer in the longwall.

Keywords: mathematical model, scraper conveyor, direct drive, synchronous motor with permanent magnets.

Математическая модель электромеханической системы разработана для наиболее распространенных скребковых конвейеров серии СП [2] с головным и концевым приводами, соединенными бесконечной тяговой цепью со скребками (рис. 1). Каждый синхронный электродвигатель с постоянными магнитами СДПМ1 и СДПМ2 головного и концевого привода включает собственно синхронную машину SM1 (SM2), которая питается от своего импульсного инвертора UZ1 и UZ2. Коммутация ключей UZ1 и UZ2 осуществляется датчиками положения ротора BQ1 и BQ2. При разработке данной модели были приняты следующие допущения: трасса конвейера прямолинейна, тяговый орган совместно с перемещаемым грузом, равномерно

распределенным по длине конвейера, представляется в виде двух сосредоточенных масс, соединенных упруговязкими связями: верхняя ветвь с грузом представляется в виде массы m_2 , а нижняя ветвь – в виде массы m_4 ; тяговый орган воспринимает только растягивающие нагрузки; тяговый орган разбит на две подсистемы: первая включает головной привод с верхней тяговой цепью, вторая – концевой привод с нижней тяговой цепью; приводные электродвигатели СДПМ1 и СДПМ2 соединены с соответствующими звездочками ЗВ1, ЗВ2 без редуктора, коэффициенты сопротивления движению постоянны на грузовой и порожней ветвях, скорости в точках набегания и сбегания тяговой цепи на звездочки равны.

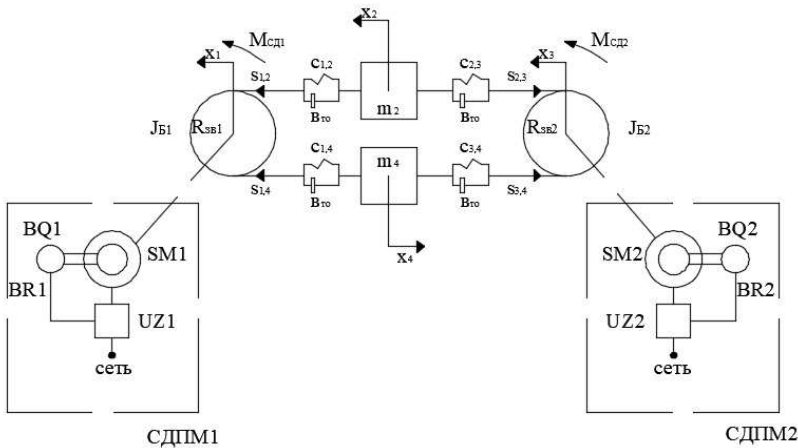


Рис. 1. Расчетная схема механической части и структура электропривода конвейера

Процессы в механической части конвейера описываются следующими уравнениями:

$$\frac{(J_{Б1} + J_{СД1})p^2 x_1}{R_{ЗВ1}} = M_{СД1} + R_{ЗВ1} (S_{4,1} - S_{1,2}); \quad (1)$$

$$\frac{(J_{Б2} + J_{СД2})p^2 x_3}{R_{ЗВ2}} = M_{СД2} + R_{ЗВ2} (S_{2,3} - S_{3,4}); \quad (2)$$

$$m_2 p^2 x_2 = (S_{1,2} - S_{2,3}) - F_{тр1}; \quad (3)$$

$$m_4 p^2 x_4 = (S_{3,4} - S_{4,1}) - F_{тр2}; \quad (4)$$

$$S_{1,2} = C_{то} (x_1 - x_2) + B_{то} (p x_1 - p x_2); \quad (5)$$

$$S_{2,3} = C_{\text{то}} (x_2 - x_3) + \beta_{\text{то}} (px_2 - px_3); \quad (6)$$

$$S_{4,1} = C_{\text{то}} (x_4 - x_1) + \beta_{\text{то}} (px_4 - px_1); \quad (7)$$

$$S_{3,4} = C_{\text{то}} (x_3 - x_4) + \beta_{\text{то}} (px_3 - px_4), \quad (8)$$

где p – оператор Лапласа, $p = d/dt$; $J_{\text{сд1}}$, $J_{\text{сд2}}$ – моменты инерции ротора первого и второго синхронного двигателя; $J_{\text{б1}}$, $J_{\text{б2}}$ – моменты инерции приводного первого и второго барабанов со звездочками; $R_{\text{зв1}}$, $R_{\text{зв2}}$ – радиусы приводных звездочек; $C_{12} = C_{\text{то}}/L_k$; $C_{23} = C_{\text{то}}/(L-L_k)$ – жесткости головной, хвостовой частей верхней ветви тяговой цепи; $C_{14} = C_{43} = C_{\text{то}}/0,5L$ – жесткости головной и хвостовой частей нижней ветви тяговой цепи; L – длина конвейера; L_k – длина головной части верхней ветви тягового органа; $C_{\text{то}}$ – погонная жесткость тягового органа, равная расстоянию между положением очистного комбайна в лаве и головным приводом конвейера; $\beta_{\text{то}}$ – коэффициент вязкости участков тягового органа; x_1 , x_2 , x_3 , x_4 – соответственно линейные перемещения первой и второй звездочки и сосредоточенных масс верхней и нижней ветвей цепи; $F_{\text{тр1}}$, $F_{\text{тр2}}$ – силы трения, действующие соответственно в верхней и нижней части тягового органа; $S_{1,2}$, $S_{1,4}$ – натяжения участков тягового органа между звездочкой головного привода и соответственно 2-й и 4-й сосредоточенными массами; $S_{2,3}$, $S_{3,4}$ – натяжения участков тягового органа между звездочкой концевой привода и соответственно 2-й и 4-й сосредоточенными массами.

Уравнения для масс:

$$m_2 = m_{\text{то}} + m_{\text{г}} = g_0 \cdot L + q_{\text{г}} \cdot L_k; \quad (9)$$

$$m_4 = m_{\text{то}} = L \cdot q_0, \quad (10)$$

где $m_{\text{г}}$, $m_{\text{то}}$ – сосредоточенные массы груза и тягового органа; $q_{\text{г}}$ и q_0 – погонные массы груза и тягового органа.

Сила трения или сила сопротивления перемещению рабочего органа на прямолинейном участке, определяется из [1]:

$$F_{\text{тр1}} = g \cdot (m_{\text{г}} \cdot \gamma_{\text{г}} + m_{\text{то}} \cdot \gamma) \text{sign}(px_2); \quad (11)$$

$$F_{\text{тр2}} = (m_{\text{то}} \cdot g \cdot \gamma_{\text{то}}) \text{sign}(px_4), \quad (12)$$

где $\gamma_{\text{то}}$, $\gamma_{\text{г}}$ – соответственно коэффициенты сопротивления движению тягового органа и груза; g – ускорение свободного падения.

При определении жесткости участков тяговой цепи $C_{1,2}$, $C_{2,3}$ и величины массы m_2 груза учитывалось положение очистного комбайна в лаве.

Уравнения для СДПМ и импульсного инвертора UZ получены при следующих допущениях: линия магнитного возврата постоянных магнитов является стабилизированной; не учитывается нелинейность магнитной цепи машины; в системе управления двигателем обеспечена компенсация действия перекрестных обратных связей [3].

В этом случае операторная структурная схема одного из двигателей СДПМ1, СДПМ2 представлена на рис. 2, в которой учитывается, что формирование динамических моментов головного и хвостового приводов происходит в соответствии с уравнениями (1, 2).

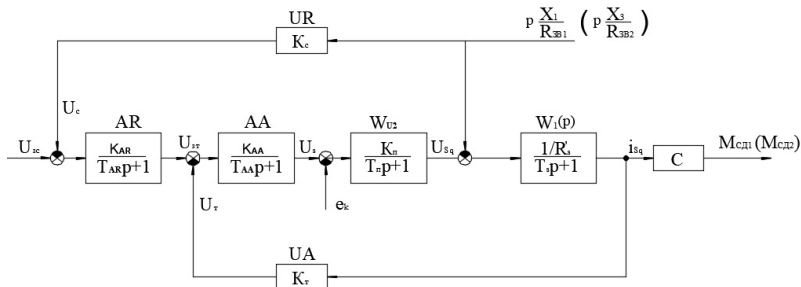


Рис. 2. Операторная схема синхронного электродвигателя с постоянными магнитами

В структурной схеме двигатель СДПМ1 (СДПМ2) представлен передаточными функциями статорной обмотки $W_1(p)$ и передаточной функцией импульсного инвертора W_{UZ} . Коэффициент C отрицательной обратной связи по ЭДС вращения. В передаточных функциях $W_1(p)$ и W_{UZ} обозначено: $T_s = L_s/R'_s$ – переходная постоянная времени статорной цепи СДПМ; L_s – взаимная индуктивность обмоток статора и ротора; R_s – переходное активное сопротивление обмотки статора; K_{Π} – коэффициент передачи преобразователя UZ по напряжению; T_{Π} – постоянная времени преобразователя UZ. Для оптимального использования двигателя введен сигнал компенсации действия внутренних перекрёстных обратных связей e_k .

Привод с СДПМ имеет подчиненную внутреннюю систему управления с двумя регуляторами, тока AA и скорости AR. Обратные связи организованы с помощью датчика тока UA и датчика скорости UR. Параметры регуляторов AA и AR синтезированы по техническому оптимуму и имеют следующие обозначения: K_T , K_C , K_{AR} , K_{AA} – коэффициенты передачи датчиков тока и скорости; регулятора скорости и тока; T_{AR} , T_{AA} – интегральные постоянные регуляторов скорости и тока; $U_{сз}$, $U_{зт}$, U_s – напряжения задания скорости, тока и напряжения.

Математическая модель электромеханической системы скребкового конвейера реализована по уравнениям (1–8) и структурной операторной схеме СДПМ поэлементно в системе Simulink пакета MatLab для скребкового конвейера СП250 с тороидальными электродвигателями и при сравнении с экспериментальными данными для пусковых режимов работы конвейера показала достоверность, равную 10–15 %.

Математическая модель двухдвигательного безредукторного электропривода скребкового конвейера с приводом СПДМ используется для исследования переходных процессов заклинивания тяговой цепи конвейера, оценки неравномерности нагружения головного и хвостового приводов и обоснования параметров системы управления электропривода конвейера.

Библиографический список

1. Бабокин Г.И., Дегтерёв Н.С. Обоснование параметров регулятора нагрузки скребкового конвейера // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2011. – С. 130–134.
2. Бабокин Г.И., Шпрехер Д.М. Математическая модель двухдвигательного конвейера с регулируемым электроприводом: материалы V Междунар. (XVI Всерос.) конф. по автоматизирован. электроприводу АЭП-2007 (18–21 сентября 2007). – СПб., 2007. – С. 365–366.
3. Гуляев И.В., Волков А.В., Попов А.А., Бобров М.А. Векторное управление синхронным двигателем с постоянными магнитами // Научно-технический вестник Поволжья. – 2015. – № 5. – С. 187–190.

Сведения об авторах

Готовцева Валерия Афанасьевна – аспирантка кафедры «Энергетика и энергоэффективность горной промышленности» Национального исследовательского технологического университета «Московский институт стали и сплавов», Горный институт, г. Москва, e-mail: Shumprui7@mail.ru.

Бабокин Геннадий Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры «Энергетика и энергоэффективность горной промышленности» Национального исследовательского технологического университета «Московский институт стали и сплавов», Горный институт, г. Москва, e-mail: babokinginov@yandex.ru.

И.Я. Дятлов, Н.М. Труфанова

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВУЛКАНИЗАЦИИ

В данной статье представлено исследование процесса вулканизации при помощи ротационного реометра. Получены зависимости степени вулканизации от температуры и времени. По полученным результатам были рассчитаны скорости изготовления кабеля с резиновой изоляцией.

Ключевые слова: резина, вулканизация, степень вулканизации, время вулканизации, реометр.

I.Ya. Dyatlov, N.M. Trufanova

CURING PROCESS EXPERIMENTAL RESEARCH

The article presents a study of the vulcanization process using a rotational rheometer. Dependences of the vulcanization degree on temperature and time are obtained. The production rates for rubber-insulated cables were calculated.

Keywords: rubber, curing, vulcanization, curing rate, curing time, curing degree, rheometer.

Вулканизация – один из важнейших этапов изготовления кабельно-проводниковой продукции с резиновой изоляцией. В ходе этого процесса происходит образование поперечных связей между молекулами резиновой смеси. Благодаря этому увеличиваются прочностные характеристики изделия, химическая стойкость, диэлектрические свойства. Основным показателем данного процесса является степень вулканизации, показывающая отношение числа сшитых молекул к числу молекул, которые могли бы сшиться.

На коэффициент сшивки влияет множество факторов: температура, параметры среды вулканизации, скорость линии, толщина и рецептура изоляционного слоя. Исследованию данного вопроса посвящено множество научных работ как отечественных, так и зарубежных.

Источник [1] описывает стандартную методику определения параметров вулканизации для резиновых смесей на безроторных реометрах.

Оценке кинетических процессов при вулканизации посвящено исследование [2]. Рассмотрению протекания процесса вулканизации внутри массивных изделий уделено внимание в статье [3].

Целью данной работы являлось экспериментальное исследование процесса вулканизации.

Задачей исследований было изучение вулканизационных свойств резиновой смеси.

Для экспериментального исследования зависимости степени сшивки от температуры и времени был выбран метод оценки модуля материала в зависимости от температуры аналогично стандартной методике [1]. Эксперимент проводился на реометрическом оборудовании Discovery Hybrid Rheometer (DHR-2).

Исследуемые образцы имели следующие параметры. В качестве исследуемого материала была выбрана резина марки ТСШ-33. Изначально материал был в виде вальцованной резины, толщина листа ~2 мм. Из данного листа вырезались диски диаметром 30 мм.

Образец являлся весьма пластичным материалом со слабыми упругими свойствами и заметным запахом.

Программа эксперимента. Подготовленный образец в виде диска помещался между двумя рабочими плоскостями реометра. Плоскости нагревались до температуры 80 °С, затем плавно сжимались до заданного (1 мм) зазора между ними с усилием не более 40 Н. Далее образец нагревался до заданной температуры 150,160,170,180,190 °С. При этом к образцу прикладывалась осциллирующая нагрузка с определенной амплитудой и частотой.

В ходе эксперимента снималась зависимость модуля от времени выдержки образца при заданной температуре.

Полученные результаты. К концу цикла испытаний было получено семейство кривых зависимостей модуля от времени при определенной температуре.

Было принято, что минимум модуля соответствует началу процесса вулканизации и 0 % сшитых молекул, а максимум соответствует ее завершению со степенью вулканизации 100 %.

Полученная зависимость представлена на рис. 1. Как видно из рис. 1, начало вулканизации происходит в момент времени около 200 с после начала эксперимента, что соответствует достижению образцом температуры порядка 140 °С. Это температура начала распада перекиси дикумила – катализатора вулканизации.

Из графика $G = f(t, T)$, где $T = 190$ °С, видно, что при достижении максимального значения модуля через некоторое время он

снижается. Это может быть обусловлено процессами термодеструкции компонентов резиновой смеси.

Для образцов, подвергавшихся вулканизации, при температурах ниже 190 °С за время эксперимента такого эффекта не наблюдалась.

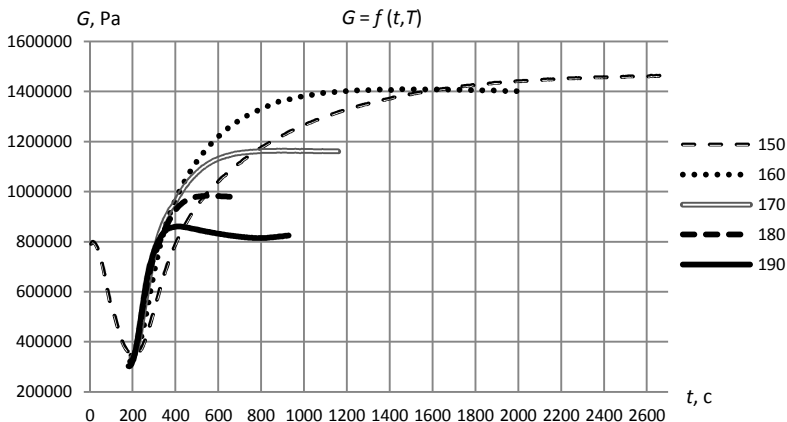


Рис. 1. Семейство кривых $G = f(t, T)$

По полученным данным можно рассчитать время вулканизации образца: в момент времени 190 с степень вулканизации принимаем 0 %, а 100 % принимаем, когда график зависимости принимает максимальное значение.

Тогда время сшивки образца найдем как разницу времен при 100 и 0 % сшивки:

$$t_{\text{вулк. } 190^{\circ}\text{C}} = t_{100\%} - t_{0\%} = 400 - 181 = 219 \text{ с} = 3,65 \text{ мин.} \quad (1)$$

Скорость изолирования определим как отношение длины вулканизационной линии к времени вулканизации:

$$v_{190^{\circ}\text{C}} = 83 / t_{\text{вулк}} = 83 / 3,65 = 22,74 \text{ м/мин.} \quad (2)$$

Из результатов расчетов (таблица) можно заметить, что с ростом температуры значительно снижается время вулканизации (при увеличении температуры на 10 °С время вулканизации снижается примерно в 1,66 раза в диапазоне температур 160–190 °С).

Для оценки степени вулканизации в зависимости от температуры и времени проводились следующие вычисления.

Степень вулканизации образца $\Phi_{t,190}$, выдержанного при 190°C в момент времени t ,

$$\Phi_{t,190} = \frac{G_{t,190} - G_{\text{MIN},190}}{G_{\text{MAX},190} - G_{\text{MIN},190}}. \quad (3)$$

Таким образом, получим степень сшивки для всего семейства кривых $G = f(t, T)$ и перейдем к семейству кривых $\Phi = f(t, T)$, представленному на рис. 2.

С помощью полученного графика можно получать важный производственный параметр – скорость экструзионной линии.

Время сшивки в зависимости от температуры вулканизации

Температура, $^{\circ}\text{C}$	$t_{0\%}$, с	$t_{100\%}$, с	$t_{\text{вулк}}$, с	$t_{\text{вулк}}$, мин	V , м/мин
150	206	2600	2394	39.90	2.08
160	194	1200	1006	16.77	4.95
170	194	800	606	10.10	8.22
180	188	550	362	6.03	13.76
190	181	400	219	3.65	22.74

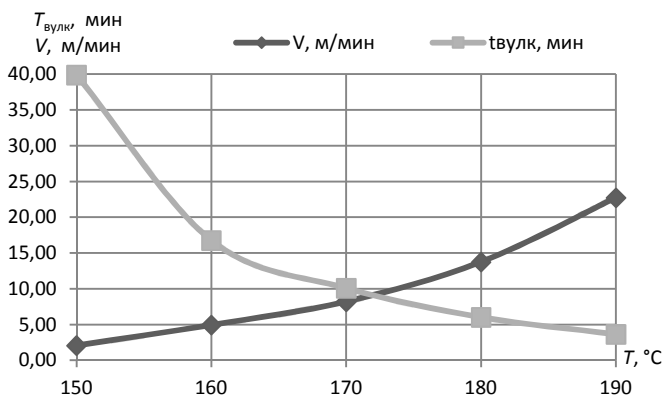


Рис. 1. Степени сшивки для всего семейства кривых $G = f(t, T)$

Итак, чтобы получить степень вулканизации 80 % при температуре среды 180°C , потребуется $150 \text{ с} = 2 \text{ мин } 30 \text{ с}$, а расчетная скорость производства для линии длиной 83 м составит $83/2,5 = 33,2 \text{ м/мин}$.

По наклонам кривых вулканизации (рис. 3) можно увидеть, как влияет температура на скорость сшивки. Например, для вулканизации образца при температуре 190°C с 80 до 90 % требовалось 21 с,

что составит 0,48 % /с, а при температуре 180 °С потребовалось 40 с, что составит 0,25 % /с.

Таким образом, реализованная экспериментальная методика, полученная в ходе работы, позволяет:

- 1) определить время и степень вулканизации для образцов резиновой смеси при разных температурных режимах;
- 2) спрогнозировать степень сшивки готового изделия, если имеются данные о технологическом процессе;
- 3) получать константы закона Аррениуса, при реакции первого рода.

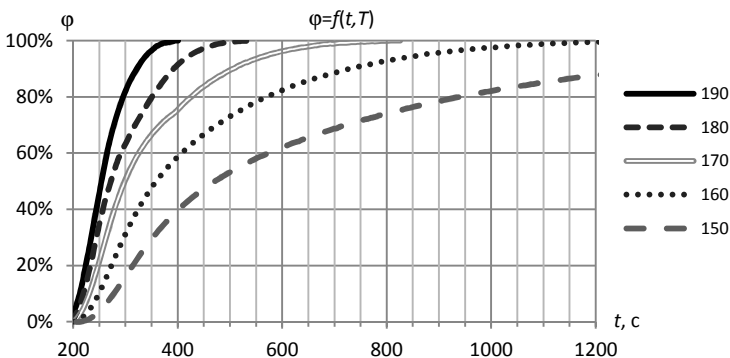


Рис. 3. Зависимость степени сшивки от времени и температуры вулканизации

$$\begin{cases} k_1 = A e^{\frac{-E_0}{RT_1}} \\ k_2 = A e^{\frac{-E_0}{RT_2}} \end{cases} = \begin{cases} A = k_1 e^{\frac{E_0}{RT_1}} \\ k_2 = k_1 e^{\frac{E_0}{RT_1} - \frac{E_0}{RT_2}} \end{cases} = \begin{cases} A = k_1 e^{\frac{E_0}{RT_1}} \\ \frac{k_2}{k_1} = e^{\frac{E_0}{RT_1} - \frac{E_0}{RT_2}} = e^{\frac{E_0 - E_0}{RT_1 RT_2}} = e^{\frac{E_0 (T_2 - T_1)}{RT_1 T_2}} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} A = k_1 e^{\frac{E_0}{RT_1}} \\ \ln\left(\frac{k_2}{k_1}\right) = \ln\left(e^{\frac{E_0 (T_2 - T_1)}{RT_1 T_2}}\right) = \frac{E_0 (T_2 - T_1)}{RT_1 T_2} \ln(e) \end{cases} = \begin{cases} A = k_1 e^{\frac{E_0}{RT_1}} \\ E_0 = \frac{RT_1 T_2 \ln\left(\frac{k_2}{k_1}\right)}{(T_2 - T_1)} \end{cases}$$

где k – скорость реакции, A – предэкспонента, E_0 – энергия активации вулканизации.

Данные константы можно использовать при математическом моделировании процесса вулканизации, как это сделано в работах [4–6].

Библиографический список

1. ГОСТ Р 54547-2011. Смеси резиновые. Определение вулканизационных характеристик с использованием безроторных реометров.
2. Кинетика и механизм вулканизации бутадиен-нитрильного каучука пара-динитрозобензолом / Я.О. Ключников, О.Р. Ключников, Т.В. Макаров, С.И. Вольфсон // Вестник Казан. технолог. ун-та. – 2011. – № 15. – С. 107–110.
3. Моделирование кинетики неизотермической вулканизации массивных резиновых изделий / В.И. Молчанов, О.В. Карманова, С.Г. Тихомиров, Ю.В. Пятаков, А.В. Касперович // Химия, технология органических веществ и биотехнология: тр. БГТУ. – Белгород: Изд-во Белгород. гос. технолог. ун-та им. В.Г. Шухова, 2014. – № 4.
4. Мамбетова Е.А., Труфанова Н.М. Математическое моделирование температурных полей и степени вулканизации в процессе вулканизации типичных кабельных изделий // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления», – 2012. – № 6. – С. 152–158.
5. Труфанова Н.М., Пасынков Д.П. Математическая модель и численный анализ процесса вулканизации резиновой изоляции кабелей // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – № 5. – С. 304–307.
6. Mohammad-Reza Erfanian, Morteza Anbarsooz, Mohammad Moghiman. Three dimensional simulation of a rubber curing process considering variable order of reaction // Applied Mathematical Modelling. – 2016. – P 1–13

Сведения об авторах

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

Дятлов Илья Яковлевич – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КТЭ-16-1м, г. Пермь, e-mail: d.i.994@yandex.ru.

А.Н. Кузнецов, А.Г. Щербинин

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАЦИОНАРНОЙ ЗАДАЧИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ, ПРОЛОЖЕННЫХ В ЗЕМЛЕ

В данной статье рассмотрено моделирование процессов тепловыделения кабельных линий. Проведено определение токовых нагрузок силовых кабелей с полиэтиленовой изоляцией на напряжение 10 кВ по стандартным методикам и с помощью программного комплекса ANSYS. Построены температурные поля для различных условий прокладки. Проведен сравнительный анализ результатов.

Ключевые слова: токовая нагрузка кабеля, условия прокладки, математическое моделирование.

A.N. Kuznetsov, A.G. Shcherbinin

MATHEMATICAL MODELING OF THE STATIONARY THERMAL CONDUCTIVITY PROBLEM OF POWER CABLES LAID IN THE GROUND

In this article the modeling of heat dissipation of cable lines is considered. The current loads of power cables with polyethylene insulation on the voltage of 10 kV are determined by standard methods and using the ANSYS software. Temperature fields for different laying conditions are constructed. A comparative analysis of the results is carried out.

Keywords: cable current load, laying conditions, mathematical modeling.

Кабельные линии с силовыми кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена находят широкое применение в электрических сетях всех классов напряжений. Монтаж силовых кабелей может осуществляться на воздухе либо в земле. Вырабатываемый ресурс кабельных линий определяется тепловыми режимами их работы. Тепловые режимы работы зависят от таких факторов, как конструкционное исполнение кабельных линий и кабельных сооружений, от условий теплообмена, теплофизических характеристик применяемых материалов, а также от значения протекающего номинального тока.

При монтаже кабельных линий под землей используют траншеи и кабельные сооружения, такие как коллекторы, туннели, каналы и др. Одним из распространенных и простых способов прокладки

кабельной линии является прокладка в траншее. Для силовых кабелей напряжением до 20 кВ глубина залегания кабельной линии от поверхности земли должна быть не менее 0,7 м*.

Объектом численного моделирования является кабель марки АПвП с алюминиевой многопроволочной токопроводящей жилой сечением 240 мм² и изоляцией из сшитого (вулканизированного) полиэтилена. Прокладку трехфазной кабельной линии на напряжение 10 кВ частотой 50 Гц можно организовать с помощью одного трехжильного кабеля или трех одножильных кабелей (рис. 1. *а, б*). На рис. 1, *а* приведен способ прокладки кабельной линии, сформированной из трех одножильных кабелей в горизонтальной плоскости, а на рис. 1, *б* – треугольником. Расстояние между одножильными горизонтально расположенными кабелями принималось равным диаметру кабеля.

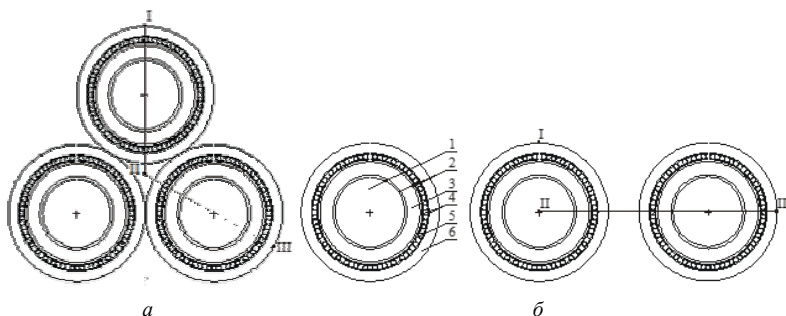


Рис. 1. Кабели марки АПвП на напряжение 10 кВ: *а* – три одножильных в горизонтальной плоскости; *б* – три одножильных треугольником; 1 – токопроводящая жила; 2 – два слоя экрана из полупроводящего вулканизированного полиэтилена; 3 – изоляция из вулканизированного полиэтилена; 4 – обмотка из нетканого полотна; 5 – экран из медных проволок; 6 – полиэтиленовая оболочка

Данная задача может быть решена расчётным методом или же с помощью моделирования. Расчёт осуществляется по ГОСТ Р МЭК 60287. Данный стандарт вообрал в себя достаточно полную методику расчёта токовых нагрузок, а также множество нюансов, касающихся конструкций различных видов кабелей и условий их прокладки. Однако более универсальный и точный подход по определению токовых нагрузок – это моделирование. Примером может быть

* Ларина Э.Т. Силовые кабели и высоковольтные кабельные линии. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1996. – 464 с.

программный комплекс ANSYS, в основу которого положен метод конечных элементов.

Для решения задачи вводится эквивалентная расчётная область в виде массива земли: с длиной 5 м и глубиной 2 м.

При построении математической модели были сделаны следующие допущения:

- процесс стационарный;
- кабельные линии считаются бесконечно длинными, что позволяет рассматривать процесс в двумерной постановке и не учитывать диффузию тепла в продольном направлении;
- солнечной радиацией на поверхности земли пренебрегаем;
- теплофизические свойства массива земли и полиэтилена постоянны.

С учётом сделанных допущений определяющая система дифференциальных уравнений примет следующий вид:

- уравнение теплопроводности для кабеля:

$$\lambda \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right) \right) + q_v = 0, \quad (1)$$

- уравнение теплопроводности для массива земли:

$$\lambda \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right) \right) = 0, \quad (2)$$

где x, y – декартовы координаты, м; t – температура, °С; q_v – мощность внутреннего источника тепла, Вт/м³; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С); c – удельная теплоемкость земли; ρ – плотность земли, кг/м³.

Внутренний источник тепла q_v определяется по закону Джоуля–Ленца:

$$q_v = \frac{I^2 R_{\approx}}{S}, \quad (3)$$

где I – ток, А; $R_{\approx}$ – электрическое сопротивление токопроводящей жилы переменному току, Ом/м; S – площадь поперечного сечения токопроводящей жилы, м².

На внешней поверхности расчетного объема задается граничное условие конвективного теплообмена:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha (T - T_{\text{ср}}); \quad (4)$$

здесь α – коэффициент теплоотдачи воздуха, $\alpha = 10$ Вт/м²·°С; $T_{\text{ср}}$ – температура воздуха, $T_{\text{ср}} = 20$ °С.

На границах раздела сред задаётся равенство тепловых потоков:

$$\lambda_i \cdot \frac{\partial t_i}{\partial n} = \lambda_{i+1} \cdot \frac{\partial t_{i+1}}{\partial n}. \quad (5)$$

Также задаётся равенство температур соприкасающихся поверхностей:

$$T_i = T_{i-1}. \quad (6)$$

Поставленная задача решалась методом конечных элементов в среде инженерных расчетов ANSYS Fluent, а для построения геометрической модели и разбиения ее на конечные элементы использовался препроцессор ICM CFD.

С целью определения токовых нагрузок кабеля была разработана итерационная процедура, в которой на каждом шаге решались уравнения теплопроводности и определялось температурное поле в кабеле и в расчетной области вокруг кабеля. Далее подбиралось такое значение рабочего тока, при котором максимальная температура в токопроводящей жиле с заданной точностью равнялась допустимому значению. Для силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена максимальная рабочая температура жилы равна 90 °С.

Результаты расчетов

На рис. 2 представлены результаты распределения температурного поля при прокладке кабелей в земле, расположенных в горизонтальной плоскости.

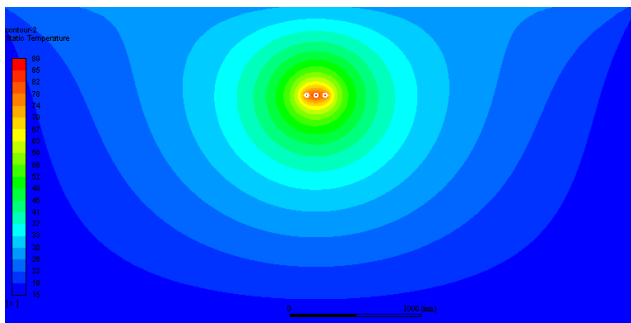


Рис. 2. Распределение температурного поля при прокладке кабелей в горизонтальной плоскости

К самой жиле был применен тепловой поток, равный 104 000 Вт/м³, в результате чего жила нагрелась до температуры 89 °С. Токовая нагрузка будет равна 471,8 А.

На рис. 3 представлены результаты распределения температурного поля при прокладке кабелей в земле, расположенных треугольником.

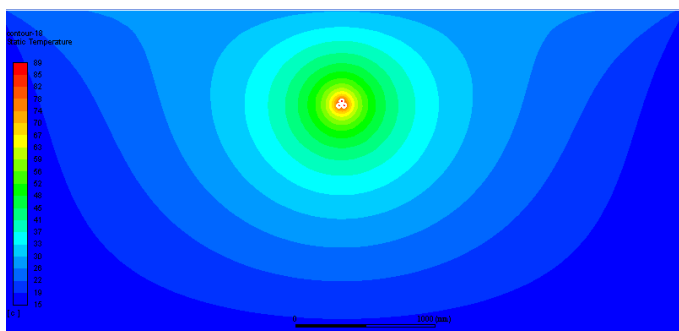


Рис. 3. Распределение температурного поля при прокладке кабелей треугольником

Для достижения температуры кабеля, равной 89°C , был приложен тепловой поток, равный $103\,000\text{ Вт/м}^3$. Токовая нагрузка равна $469,1\text{ А}$.

Сведения об авторах

Кузнецов Алексей Николаевич – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КТЭИ-14-16, г. Пермь, e-mail: lexa59ru@yandex.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.

С.Ю. Макаров, А.В. Казаков

МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ СТАРЕНИЯ СВОЙСТВ ИЗОЛЯЦИИ

В данной статье рассмотрены различные методы изучения старения свойств поливинилхлоридной изоляции, приведены результаты измерений свойств образцов материала, выдерживаемых длительное время при высокой температуре. Построены графики зависимости удельного электрического сопротивления и тангенса угла диэлектрических потерь от времени выдержки.

Ключевые слова: полимер, тепловое старение, ПВХ.

S.Yu. Makarov, A.V. Kazakov

METHODS FOR STUDYING THE AGING PROPERTIES OF INSULATION

In this article, various methods for studying the aging properties of polyvinylchloride insulation are considered, and the results of measurements of the properties of specimens of a material held for a long time at a high temperature are given. Plots of the dependence of the specific electrical resistance and the dielectric loss tangent on the aging time are constructed.

Keywords: polymer, thermal aging, P.V.C.

На сегодняшний день самыми распространенными материалами для изоляции в кабельной промышленности являются полимерные материалы, такие как поливинилхлорид (ПВХ), сшитый полиэтилен (СПЭ) и др. Такая популярность полимерных материалов объясняется их современностью, технологичностью их наложения на жилу (по сравнению с бумажной изоляцией) и их высокими эксплуатационными показателями.

Однако кабели и провода с полимерной изоляцией обладают рядом недостатков, одним из которых является старение свойств полимеров. Старение полимеров – это сложный комплекс, состоящий из химических и физических процессов, происходящих под влиянием условий окружающей среды, при их переработке, эксплуатации и хранении, приводящий к необратимым или обратимым изменениям свойств полимеров. Часто вместо термина «старение» употребляют термин «деструкция», иногда «деградация» [1].

Процессы физической деградации обратимы и не приводят к разрывам или сшивке участков полимерных макромолекул. Одной из главных задач расчета процессов деградации является численное прогнозирование изменения свойств полимерных изделий. Если время надежной работы будет занижено, то изоляция из полимеров будет изъята из эксплуатации раньше, чем выработается ее ресурс, что неоправданно с экономической точки зрения. Если же сроки использования будут завышены, то полимерная изоляция выйдет из строя во время работы, что может привести к аварии или еще более тяжелым последствиям.

Одним из методов изучения старения свойств полимеров служит отслеживание изменения массы материала в зависимости от температуры. Для этого используется термогравиметрический анализатор, который является тепловым измерительным устройством, проводящим анализ изменения массы под управлением компьютера и соответствующего программного обеспечения. Данное устройство измеряет скорость и степень изменения массы вещества в контролируемой атмосфере как функцию возрастающей температуры или как функцию времени – изотермически. Исследовать методом термогравиметрии можно любой полимер, который подвержен изменению веса и для фазовых переходов, возникающих вследствие реакций разложения, окисления или дегидратации. Совокупность информации, сведенной в таблицы и графики, помогает исследователю установить процентное изменение массы и соотнести его с химическим строением материала, понять, как прошла реакция. Это помогает определить время эксплуатации данного полимера.

Еще один способ изучения старения свойств полимеров – это пенетрация. Пенетрация – метод, основанный на изучении степени проникновения конусного тела в вязкую среду, параметр, характеризующий свойства нефтепродуктов. Определение термомеханических свойств материалов производится при помощи специального прибора, в котором образец подвергается постоянной механической нагрузке тела в условиях нагрева. По глубине смещения цилиндрического наконечника в полимер оценивается твердость исследуемых материалов в зависимости от температуры. Таким образом, можно исследовать одни и те же марки пластиков, узнавать различие в составе и термомеханических свойствах. Все эти параметры могут указывать на технологичность материалов. Например, в связи с этим

может возникать потребность в изменении температурных режимов при переходе на материалы другого производителя [2].

Одним из длительных методов изучения является выдерживание образцов в сушильных шкафах. Материал подвергается действию повышенной температуры и спустя некоторое время вынимается с последующим измерением его характеристик.

В ходе эксперимента были измерены характеристики ПВХ с применением пластика Lousgran в течение двадцати двух дней при температуре 110 °С. Процесс производился в сушильном шкафу фирмы BINDER. По прошествии заданного времени образцы вынимались для измерения электрических характеристик при температуре 25°С. Сопротивление материала измерялось на приборе КИСИ-1 фирмы «Контакт СК», а емкость и тангенс угла диэлектрических потерь измерялись прибором МЕР-5СА. Измеренные данные приведены в таблице.

Результаты измерений

Часы	R_{cp} , Ом·см	C, нФ	$tg\delta$
0	293,78	338,1	0,0479
192	256,9	329,4	0,0478
360	196,36	348,1	0,0491
528	23,2	363,9	0,0557

Из полученных результатов были построены зависимости сопротивления и тангенса угла диэлектрических потерь от времени. Как видно на рис. 1, с течением времени под влиянием температуры сопротивление полимера падает, причем со временем интенсивность процесса возрастает. На рис. 2 тангенс угла диэлектрических потерь растет, что ведет к ухудшению свойств изоляционного материала.

Для дальнейшего внедрения данных изменения свойств изоляции во времени целесообразно их представить в виде математического выражения. В частности, в виде полиномов 2-й и 3-й степени изменение сопротивления будет выглядеть, как показано в уравнении

$$R_{cp} = 0,0011x^2 - 7,2558x + 293,78. \quad (1)$$

Выражение изменения тангенса угла диэлектрических потерь показано ниже в уравнении:

$$tg\delta = e^{-100} \cdot x^3 - 5e^{-80} \cdot x^2 + 4e^{-60} \cdot x + 0,0479, \quad (2)$$

где x – количество часов.

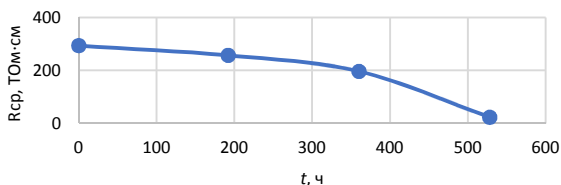


Рис. 1. Кривая изменения сопротивления от времени

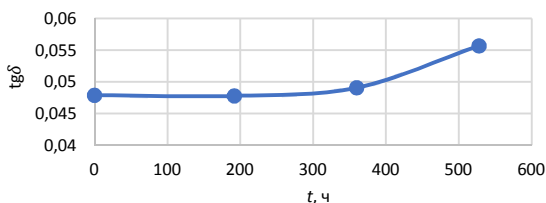


Рис. 2. Кривая изменения тангенса диэлектрических потерь от времени

Закключение. Была проведена серия экспериментов, обработка и формализация результатов которых позволили дополнить математическую модель нестационарного режима работы кабельной линии. В дальнейшем планируется проведение анализа изменения функциональной работоспособности всей кабельной линии при наличии в ней процессов деградации электрических свойств изоляционных материалов.

Библиографический список

1. Исследование теплового старения полимеров / Д.А. Богданов, Е.В. Субботин, С.В. Ершов, А.В. Казаков. – Пермь.: Студент, 2014. – 9 с.
2. Субботин Е.В., Щербинин А.Г., Ершов С.В. Термический анализ ПВХ-пластиков. – Пермь.: Доцент, 2013. – 4 с.

Сведения об авторах

Макаров Сергей Юрьевич – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. МЭ-14-16, г. Пермь, e-mail: ztemaster11@gmail.ru.

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

Д.Р. Никитин, А.Е. Терлыч

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ИНДУКЦИОННО-РЕЗИСТИВНОГО НАГРЕВА

В настоящей работе проведены исследования параметров системы индуктивно-резистивного нагрева (ИРСН) в зависимости от величины протекающего тока, конструктивного исполнения системы. Получены зависимости температуры и параметры элементов ИРСН от величины питающего тока.

Ключевые слова: СКИН-система, индуктивный нагрев, индуктивно-резистивный нагрев.

D.R. Nikitin, A.E. Terlych

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE PARAMETERS OF THE INDUCTION-RESISTANCE HEATING SYSTEM

In the present work, the parameters of the inductive-resistive heating system are investigated from the current value, the design of the system. The temperature dependences and the parameters of the inductive-resistive heating system elements on the supply current are obtained.

Keywords: inductive heating, inductive-resistive heating.

Для обогрева трубопроводов широкое применение получили системы индуктивно-резистивного нагрева. К плюсам данной системы можно отнести: экономичность, возможность обогрева протяженного трубопровода, электробезопасность, простоту монтажа, надежность и ремонтпригодность.

Данное исследование направлено на анализ реальной ИРСН с целью выработки подходов к моделированию таких систем. Исследование заключалось в получении зависимости температуры стальной трубы от величины протекающего тока для различного исполнения системы и определения реактивного сопротивления системы.

Экспериментальная установка представлена на рис. 1. Установка состоит из трансформатора 1, ферромагнитной стальной трубы 2, медной ТПЖ 3. В табл. 1 представлены геометрические параметры ИРСН.

На рис. 3, *а, б, в* схематично представлены схемы включения системы нагрева, которые были исследованы в данной работе.

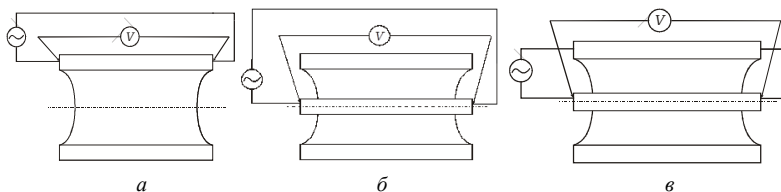


Рис. 3. Схемы включения системы нагрева: *а* – схема резистивного нагрева; *б* – схема индуктивного нагрева; *в* – схема индуктивно-резистивного нагрева

Результаты измерений для трех схем включения представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерений для трех схем включения

Схема включения	I , А	U , В	T , °С	X , мОм
Резистивный нагрев	50	0,46	35	9,23
	75	0,66	43	8,73
	100	0,82	52	8,12
Индуктивный нагрев	50	1,39	46	28,66
	75	2,30	64	26,04
	100	2,40	77	25,70
Индуктивно-резистивный нагрев	50	0,26	38	4,92
	75	0,38	49	4,68
	100	0,47	64	4,34

Для системы индуктивного нагрева были проведены дополнительные измерения с целью более точного определения зависимости реактивного сопротивления от тока, результаты которых представлены в табл. 2, а графическая зависимость – на рис. 4.

Таблица 3

Определение зависимости реактивного сопротивления от тока

I , А	X , мОм
10	10,52
30	25,16
50	28,66
75	26,04
100	25,70

Из рис. 4 можно видеть, что реактивное сопротивление системы нелинейно изменяется с ростом тока. Очевидно, что это связано с нелинейной зависимостью магнитной проницаемости от индукции магнитного поля, создаваемого проводом.

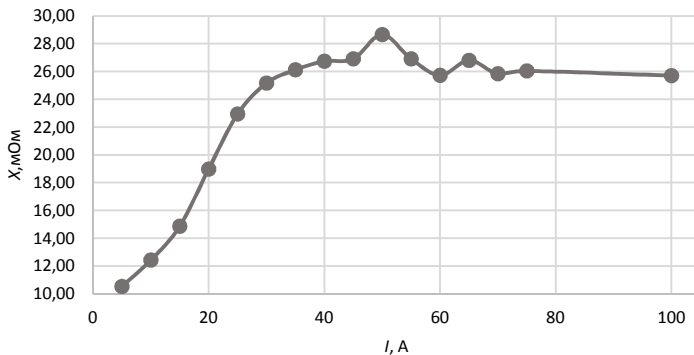


Рис. 4. Зависимость реактивного сопротивления от величины тока в системе индуктивного нагрева

На рис. 5 представлены графические зависимости температур систем нагрева от величины протекающего через них тока.

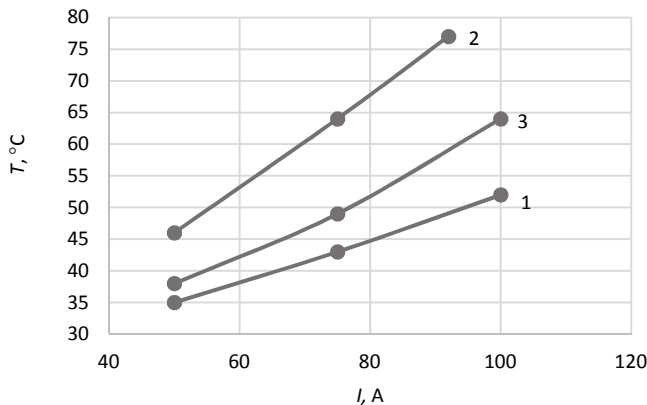


Рис. 5. Зависимость температуры систем от величины тока:
 1 – резистивного нагрева; 2 – индуктивного нагрева;
 3 – индуктивно-резистивного нагрева

Из рис. 5 видно, что наибольшее выделение активной мощности при аналогичных значениях силы тока, протекающего через систему, имеет место для системы индуктивного нагрева.

Библиографический список

1. Электронный научный архив УрФУ [Электронный ресурс]. – URL: <http://elar.urfu.ru/bitstream/10995/36351/1/aptee-2014-25.pdf> (дата обращения: 10.05.2018).
2. Кувалдин А.Б. Индукционный нагрев ферромагнитной стали. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
3. Вайнштейн Л.А. Электромагнитные волны. – 2.изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1988.

Сведения об авторах

Никитин Денис Романович – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КТЭИ-14-1б, г. Пермь, e-mail: xden-berz@mail.ru.

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

М.В. Ракова, В.В. Тиунов

РАСЧЁТ СЕЗОННЫХ И ЧАСОВЫХ ВАРИАЦИЙ ВЫХОДНОЙ МОЩНОСТИ СОЛНЕЧНОЙ ПАНЕЛИ

В данной статье приведен расчёт вариаций выходной мощности солнечной панели, установленной на склоне крыши дома в Пермском крае.

Ключевые слова: инсоляция, солнечная панель, выходная мощность в Пермском крае России.

M.V. Rakova, V.V. Tiunov

CALCULATION OF THE SEASONAL AND HOURLY VARIATIONS OF THE SOLAR PANEL OUTPUT POWER

In this article the calculation of variations of the output power of the solar panel installed on the roof slope of the house in the Perm region of Russia is shown.

Keywords: insolation, solar panel, power output in the Perm region of Russia.

Чтобы определить сезонные и часовые вариации выходной мощности солнечной панели, необходимо определить инсоляцию – поток солнечной радиации на поверхность – в данной местности. Инсоляция зависит от различных факторов: географического положения объекта, положения солнца относительно объекта в разное время суток и года, азимутального расположения объекта, угла наклона солнечной панели к горизонту.

Приближенно рассчитаем инсоляцию E , кВт·ч, солнечной панели площадью 1 м^2 за период длинной один час. Пусть φ – угол наклона солнечной панели к горизонту; $E_{\max}$ – максимально возможная солнечная радиация (инсоляция) на горизонтальную поверхность площадью 1 м^2 в данный час, кВт·ч/м²; α – высота солнца над горизонтом в данный час; A – азимут нормали к поверхности солнечной панели; A_s – азимут солнца в данный час. Все углы и азимуты измеряются в градусах. Чтобы рассчитать инсоляцию E , необходимо рассмотреть влияние угла φ наклона солнечной панели к горизонту и азимута A_s солнца в данный час.

Рассмотрим влияние угла φ наклона солнечной панели к горизонту на инсоляцию E_1 . Пусть азимут нормали к поверхности панели совпадает с азимутом солнца, т.е. солнце находится прямо перед панелью. Высота солнца α над горизонтом в данный час времени равна углу падения солнечных лучей на панель. Инсоляция в данный час будет максимальной при падении лучей солнца по нормали к поверхности солнечной батареи.

Из рис. 1, а видно, что при $\varphi = 0^\circ$ инсоляция вычисляется как

$$E_1 = E_{\max} \cdot \cos(90 - \alpha), \text{ где } \alpha > 0^\circ. \quad (1)$$

Отметим, что при $\alpha < 0^\circ$ солнце находится под горизонтом, не освещая солнечную панель, в этом случае $E_1 = 0$.

Из рис. 1, б видно, что при увеличении угла φ инсоляция будет следующей:

$$E_1 = E_{\max} \cdot \cos(90 - \alpha - \varphi), \alpha > 0^\circ, \varphi \leq 90^\circ. \quad (2)$$

Таким образом, при падении солнечных лучей по нормали к поверхности солнечной панели $\cos(90 - \alpha - \varphi) = 1$, отсюда следует, что оптимальный угол φ для расположения панелей будет равен $90 - \alpha$.

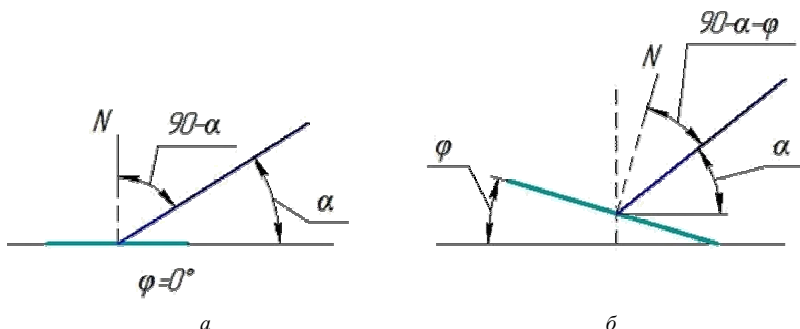


Рис. 1. Влияние угла наклона солнечной панели на ее инсоляцию

Рассмотрим влияние азимута A_s солнца в данный час на инсоляцию E_1 . Рассмотрим рис. 2.

Солнечная панель будет освещаться солнцем только при движении солнца от позиции 1 к позиции 2. Следовательно, для освещения необходимо выполнить условие:

$$|A - A_s| < 90^\circ. \quad (3)$$

При достижении солнцем линии, совпадающей с направлением нормали к поверхности солнечной батареи, инсоляция E_1 будет максимальной. Таким образом, итоговая инсоляция солнечной панели будет следующей:

$$E = E_1 \cdot \cos(|A_s - A|). \quad (4)$$

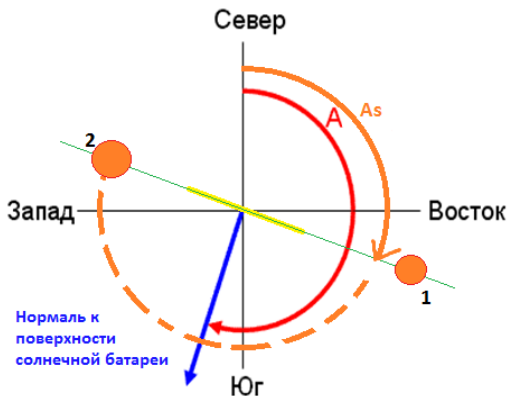


Рис. 2. Влияние азимута на инсоляцию солнечной панели

С учётом уравнений (2), (3) и (4)

$$E = E_{\max} \cdot \cos(90 - \alpha - \varphi) \cdot \cos(|A - A_s|), \quad (5)$$

где $|A - A_s| < 90^\circ$, $\alpha > 0^\circ$, $\varphi \leq 90^\circ$

Зададимся исходными данными для расчёта сезонных и часовых вариаций выходной мощности солнечной панели, установленной на склоне дома в вашей местности. Для упрощения задачи проведем расчёт вариаций для одного дня в середине каждого месяца (15-е число) и затем применим получившийся результат к каждому дню в месяце. Местоположение исследуемого объекта: дачный дом в 45 км от г. Перми в поселке Кукуштан Пермского края.

За координаты дома возьмём координаты города Перми: $58^\circ 00' 50''$ с. ш. $56^\circ 14' 56''$ в. д.

Площадь пригодная для установки солнечных батарей и её наклон к горизонту: $S_1 = 10,44 \text{ м}^2$, $\varphi_1 = 64^\circ$; $S_2 = 12,818 \text{ м}^2$, $\varphi_2 = 18^\circ$ с азимутом нормали $A_1 = 120^\circ$; $S_3 = 10,44 \text{ м}^2$, $\varphi_3 = 64^\circ$; $S_4 = 12,818 \text{ м}^2$, $\varphi_4 = 18^\circ$ с азимутом нормали $A_2 = 300^\circ$.

Поскольку пока удалось найти информацию по максимально возможной инсоляции только в г. Чермоз Пермского края, будем считать эти данные приближенно подходящими к исходному дачному дому.

Таблица 1

Максимально возможная инсоляция в г. Чермоз

Суммарная (прямая и рассеянная) солнечная радиация $E_{\max}$ на горизонтальную поверхность при действительных условиях облачности, МДж/м ² , согласно [1]												
Пункт	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Чермоз	46	117	285	431	553	599	574	431	239	105	46	25

Рассчитаем $E_{\max}$ для одного часа в каждом месяце, считая $E_{\max}$ одинаковым для каждого часа в месяце. Для этого поделим данные из таблицы на число дней в месяце и на 24. Чтобы перевести МДж/м² в кВт·ч/м², разделим получившиеся значения на 3,6 (3,6 МДж = 1 кВт·ч).

Таблица 2

Максимальная инсоляция ($E_{\max}$) за час, кВт·ч/м²

Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
0,0444	0,0484	0,1064	0,1663	0,2065	0,2311	0,2143	0,1609	0,0922	0,0392	0,0177	0,0093

Найдем справочные значения высоты солнца над горизонтом (α) и его азимута (A_s) в каждый час 15-го числа каждого месяца для координат исходного местоположения [2].

Используя уравнение (5), произведем расчёт инсоляции на 1 м² каждой панели в каждый час 15-го числа каждого месяца. Затем умножим получившиеся значения на количество дней в месяце и сложим данные по всем панелям вместе.

В итоге получим инсоляцию или выходную электрическую мощность со всех 4 панелей в течение часа суток, в течение суток, в течение определенного времени суток в месяце, в течение месяца, в течение года.

Результаты расчётов выходной электрической мощности со всех 4 панелей за каждый час суток в различных месяцах, а также суммарно за месяц и год представлены в табл. 3.

Таблица 3

Инсоляция с 4 панелей, площадью 1м² каждая

Инсоляция с 4х панелей по 1м ² , кВт·ч	Январь	Феврал	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
0:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5:00	0	0	0	0	2,987	3,047	2,756	0	0	0	0	0
6:00	0	0	0	0	5,036	5,282	4,875	3,656	0	0	0	0
7:00	0	0	0	5,289	7,145	7,576	7,073	5,285	2,844	0	0	0
8:00	0	0	3,928	6,796	9,106	9,728	9,156	6,825	3,648	1,444	0	0
9:00	0	1,656	4,709	7,99	10,67	11,49	10,88	8,074	4,268	1,682	0	0
10:00	1,624	1,844	5,157	8,636	11,54	12,56	11,96	8,801	4,575	1,783	0,671	0
11:00	1,64	1,861	5,137	8,494	11,37	12,55	12,02	8,75	4,451	1,709	0,647	0,327
12:00	1,481	1,683	4,562	7,362	9,776	10,96	10,64	7,675	3,818	1,445	0,552	0,287
13:00	1,162	1,316	3,44	5,223	6,628	7,498	7,539	5,496	2,701	1,017	0,398	0,217
14:00	0,728	0,81	1,925	2,397	2,45	2,698	3,132	2,522	1,271	0,489	0,208	0,127
15:00	0,252	0,25	0,285	0,536	1,741	2,119	1,431	0,595	0,205	0,046	0,015	0,032
16:00	0,189	0,271	1,205	3,055	5,158	5,98	5,2	3,261	1,481	0,506	0,151	0,052
17:00	0	0,682	2,346	4,888	7,528	8,621	7,842	5,194	2,411	0,835	0	0
18:00	0	0,937	3,048	5,962	8,868	10,12	9,385	6,343	2,945	1,008	0	0
19:00	0	0	3,3	6,326	9,3	10,63	9,966	6,768	3,097	0	0	0
20:00	0	0	0	6,087	8,987	10,35	9,755	6,583	0	0	0	0
21:00	0	0	0	0	8,118	9,458	8,943	0	0	0	0	0
22:00	0	0	0	0	0	8,183	0	0	0	0	0	0
23:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Итого за месяц	7,075	11,31	39,04	79,04	126,4	148,8	132,6	85,83	37,71	11,96	2,643	1,043
Итого за год с 4х панелей	683,5											

На основании табл. 3 построим графики 1,2 вариаций инсоляции (рис. 3, 4).

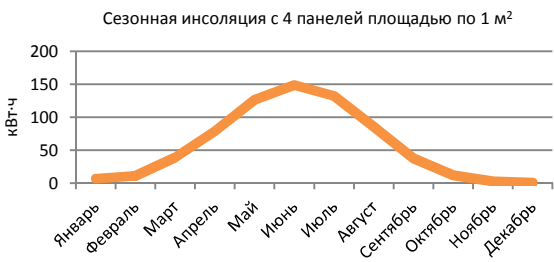


Рис. 3. График 1 вариации сезонной инсоляции солнечной панели

В итоге за год с 4 панелей площадью 1 м² каждая можно получать электроэнергии в размере около 683 кВт·ч. При пересчёте на площадь всей крыши дачного дома можно получать около 7792 кВт·ч. Следует также учесть, и условия облачности в каждый год неодинаковы, что часть энергии будет теряться при преобразовании, поэтому представленный расчёт можно считать лишь приближенным. Из табл. 4 видно, что за дачный сезон (июнь–конец сентября) 4 панели площадью 1 м² каждая могут вырабатывать около 405 кВт·ч.

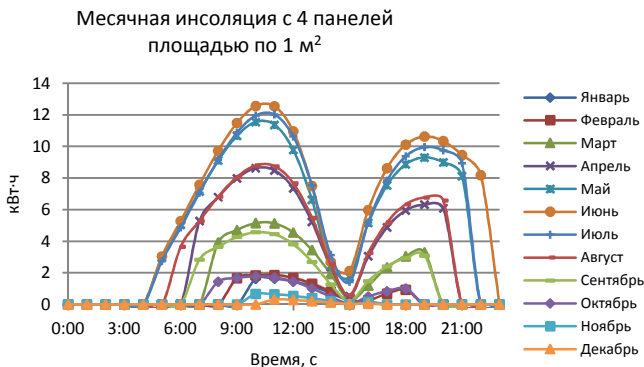


Рис. 4. График 2 вариации инсоляции солнечной панели в течение дня за месяц

При среднем потреблении 250 кВт·ч за дачный сезон в данном доме такого количества панелей хватит для энергоснабжения всего дома даже с учётом плохих погодных условий, что позволяет увидеть перспективу применения солнечных панелей в «малой энергетике» даже на малосолнечном Западном Урале.

Библиографический список

1. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Выпуск 09. Пермская, Свердловская, Челябинская, Курганская области, Башкирская АССР. – Л.: Ленинград Гидрометеиздат, 1990. – 557 с.
2. Положение Солнца на заданную дату. Таблица азимута и высоты над горизонтом [Электронный ресурс]. – URL: <https://planetcalc.ru/4270/> (дата обращения: 05.05.2018).
3. Ориентация и угол наклона солнечных коллекторов [Электронный ресурс]. – URL: <http://solarsoul.net/orientaciya-i-ugol-naklona-solnechnyx-kollektorov> (дата обращения: 04.05.2018).

Сведения об авторах

Ракова Мария Викторовна – студентка Пермского национально-го исследовательского политехнического университета, гр. ЭС-16-16, г. Пермь, e-mail: mary_perm@mail.ru.

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

М.А. Третьяков, А.В. Казаков

СРАВНЕНИЕ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ КАБЕЛЬНЫХ ЖИЛ РАЗЛИЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ

В данной статье рассмотрено моделирование процессов тепловыделения кабельных жил различной конструкции. Были решены такие задачи, как зависимость нагрева токопроводящих жил от их конструкции, а также от величины приложенного теплового потока. Построены графики зависимости распределения температуры по радиусу кабеля.

Ключевые слова: тепловыделение, конструкция жилы, тепловой поток.

M.A. Tretyakov, A.V. Kazakov

COMPARISON OF THE HEAT DISSIPATION OF CABLE CORES OF DIFFERENT DESIGN

In this paper, modeling of the processes of heat dissipation of cable cores of various designs is considered. The following tasks were solved: the dependence of the heating of conductors on their structures, as well as on the magnitude of the applied heat flux. The graphs of the temperature distribution along the cable radius are constructed.

Keywords: heat release, the structure core, heat flow.

Объектом численного моделирования является кабель марки ПуГВ 1×35* с токопроводящей жилой в многопроволочном и однопроволочном исполнении (материал жилы – медь, материал изоляции – ПВХ-пластикат). Данная конструкция находится в воздухе.

Схематическое изображение рассматриваемой конструкции дано на рис. 1–2.

Для решения задачи были сделаны допущения:

- задача стационарная;
- задача плоская, передачи тепла по оси Z не происходит;
- свойства материалов постоянны.

На границе раздела разнородных сред реализуется условие идеального теплового контакта.

* ГОСТ 31947-2012. Провода и кабели для электрических установок на номинальное напряжение до 450/750 В включительно. Общие технические условия.

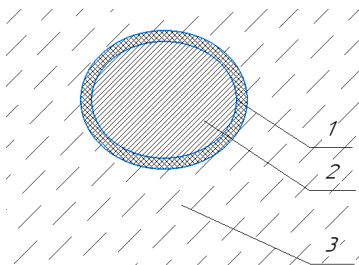


Рис. 1. Кабель с однопроволочной жилой: 1 – изоляция, 2 – токопроводящая жила, 3 – воздух

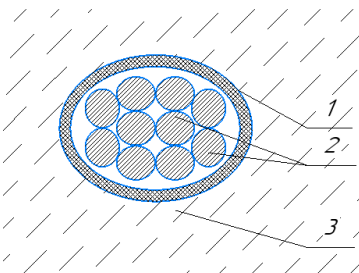


Рис. 2. Кабель с многопроволочной жилой: 1 – изоляция, 2 – токопроводящая жила, 3 – воздух

С учетом сделанных допущений система дифференциальных уравнений выглядит следующим образом:

- уравнение энергии для воздуха:

$$\rho \vartheta \quad c \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + q_v; \quad (1)$$

- уравнение движения:

$$\rho \vartheta \quad \frac{\partial \vartheta_1}{\partial x} = - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial \vartheta}{\partial x} + f; \quad (2)$$

$$f_x = 0; \quad f_y = \frac{g \beta (T - T_0)}{\rho}; \quad f_z = 0;$$

- уравнение теплопроводности:

$$\lambda \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial t}{\partial y} \right) \right) + q_v = 0, \quad (3)$$

где x, y , – декартовы координаты, м; T – температура, °C; q_v – мощность внутреннего источника тепла, Вт/м³; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C); c – удельная теплоемкость земли; ρ – плотность земли, кг/м³.

Граничные условия. Граничные условия по температуре имеют следующий вид. На внешней поверхности расчетного объема задается граничное условие конвективного теплообмена:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T - T_{\text{ср}}), \quad (4)$$

где α – коэффициент теплоотдачи воздуха ($\alpha = 5 \text{ Вт/м}^2\text{°С}$); $T_{\text{ср}}$ – температура окружающей среды, $T_{\text{ср}} = 0 \text{ °С}$.

На твердых границах конструктивных элементов задаются условия 4-го рода и равенство температур:

$$\lambda_i \frac{\partial T}{\partial n} = \lambda_{i-1}, \quad \frac{\partial T}{\partial n} T_i = T_{i-1}. \quad (5)$$

Этапы произведенных расчетов:

- 1) учитывалась допустимая температура, до которой может нагреваться провод, она равно 80 °С ;
- 2) в инженерном пакете ANSYS были построены модели с учетом граничных условий и начальных условий;
- 3) анализировались полученные результаты и сделаны выводы.
- 4) рассматривались различные конструкции ТПЖ кабеля.

Результаты расчетов

1. В первом опыте был рассмотрен кабель с однопроволочной жилой. К самой жиле был приложен тепловой поток, равный $130\,000 \text{ Вт/м}^3$, в результате чего кабель нагрелся до температуры $80,1 \text{ °С}$. Распределение температурного поля представлено на рис. 3.

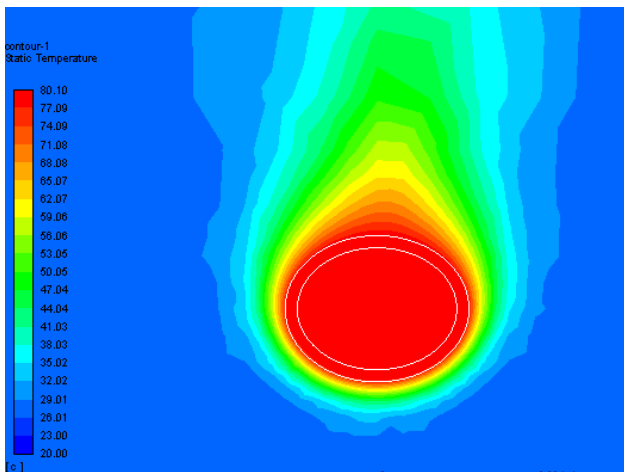


Рис. 3. Температурное поле кабеля с однопроволочной жилой

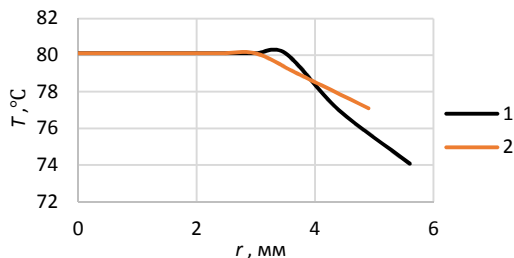


Рис. 4. Графики распределения температуры: 1 – по большому радиусу кабеля с однопроволочной жилой; 2 – по меньшему радиусу кабеля с однопроволочной жилой

2. В данном опыте был рассмотрен кабель с многопроволочной жилой. Для достижения температуры кабеля, равной $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, был приложен тепловой поток, равный $90\,000\text{ Вт/м}^3$. Распределение температурного поля представлено на рис. 4–6.

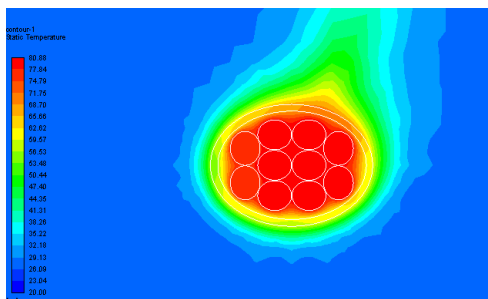


Рис. 5. Температурное поле кабеля с многопроволочной жилой

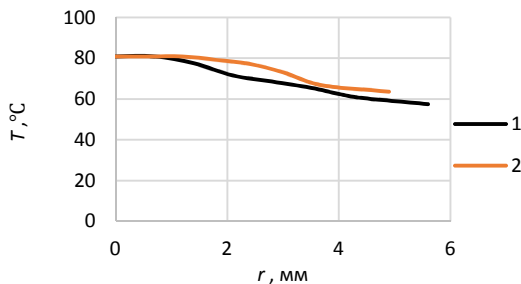


Рис. 6. Графики распределения температуры: 1 – по большому радиусу кабеля с многопроволочной жилой; 2 – по меньшему радиусу кабеля с многопроволочной жилой

Заключение. При сравнении тепловыделения кабелей с различной конструкцией токопроводящих жил было выявлено, что для нагрева кабеля до 80 °С с многопроволочной жилой был приложен тепловой поток величиной в 1,5 раза больше, чем к кабелю с однопроволочной жилой. Это объясняется тем, что у кабеля с многопроволочной жилой созданы лучше условия для теплоотвода, чем у кабеля с однопроволочной жилой. Данные расчеты могут быть использованы при определении токовой нагрузки кабельных линий в зависимости от их конструкций.

Сведения об авторах

Третьяков Максим Алексеевич – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КТЭИ-14-1б, г. Пермь, e-mail: tretyakovma1176@mail.ru.

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

А.А. Тягло, Е.В. Субботин

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ КРИСТАЛЛИЧНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

В данной работе представлены результаты экспериментов по изучению влияния режима охлаждения на структуру полимерных материалов. Исследование методом дифференциальной сканирующей калориметрии проводилось на приборе DSC Q2000. Получены температурные зависимости тепловых потоков для полиэтилена низкой плотности и полиэтилентерефталата, выполнен анализ результатов.

Ключевые слова: полимерный материал, степень кристалличности, дифференциальная сканирующая калориметрия, режим охлаждения.

A.A. Tyaglo, E.V. Subbotin

EVALUATION OF THE DEGREE OF CRYSTALLITY OF POLYMERIC MATERIALS BY THERMAL ANALYSIS METHODS

This paper presents the results of experiments to study the effect of the cooling mode on the structure of polymeric materials. Study on the method of differential scanning calorimetry was performed on the instrument DSC Q2000. Temperature dependences of heat fluxes for low-density polyethylene and polyethylene terephthalate were obtained, the results were analyzed.

Keywords: polymer material, degree of crystallinity, differential scanning calorimetry, cooling mode.

Полимеры широко применяются в самых разных отраслях современной промышленности. При этом следует отметить, что эксплуатационные характеристики готовой продукции, выполненной из данных материалов, будут существенно зависеть не только от свойств исходного сырья, но и от параметров технологического режима переработки.

В данной работе проводятся экспериментальные исследования по изучению влияния режима охлаждения на структуру полимерных материалов. Исследование методом дифференциальной сканирующей калориметрии проводилось на приборе DSC Q2000 для полиэтилена низкой плотности (ПЭ) и полиэтилентерефталата (ПЭТФ).

Дифференциальный сканирующий калориметр DSC Q2000 (рис. 1) предназначен для измерения температуры и теплового потока, сопровождающих превращение материалов. Позволяет получать качественные и количественные данные по эндотермическим (поглощение тепла) и экзотермическим (выделение тепла) процессам, происходящим при физических трансформациях, вызванных фазовыми переходами, окислением и другими явлениями в интервале температур от стеклования до области деструкции.



Рис. 1. DSC Q2000 TA Instruments

С помощью данного оборудования в работе были получены температурные зависимости теплового потока исследуемых полимеров.

Эксперименты, результаты которых представлены на рис. 2, 3, проводились по программам, описанным в таблице.

Программа проведения экспериментов для исследования материалов

Режим	Полиэтилен	Полиэтилентерефталат
Нагрев	До 200 °C со скоростью 10 °C/мин	До 350 °C со скоростью 20 °C/мин
Охлаждение	До 20 °C со скоростью –70 °C/мин	До 20 °C со скоростью –70 °C/мин
Нагрев	До 200 °C со скоростью 10 °C/мин	До 350 °C со скоростью 20 °C/мин
Охлаждение	До 20 °C со скоростью –5 °C/мин	До 20 °C со скоростью –10 °C/мин
Нагрев	До 200 °C со скоростью 10 °C/мин	До 350 °C со скоростью 20 °C/мин

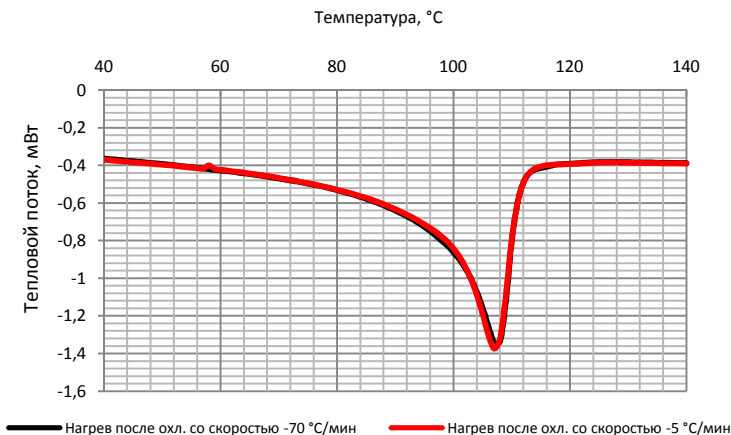


Рис. 2. Температурная зависимость теплового потока для полиэтилена

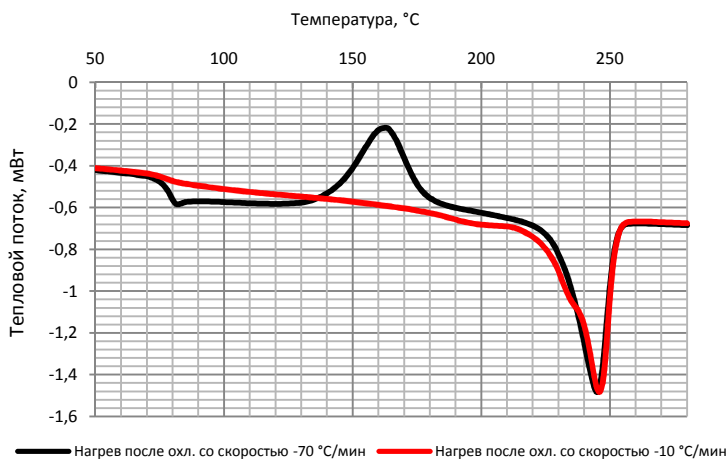


Рис. 3. Температурная зависимость теплового потока для полиэтилентерефталата

Для оценки влияния скорости охлаждения на структуру и свойства исследуемых полимеров необходимо выполнить сравнительный анализ кривых нагрева, полученных после охлаждения с разной скоростью.

Из полученных результатов (см. рис. 2, 3) видно, что температурные зависимости теплового потока для ПЭ практически не

отличаются. Исходя из этого, можно предположить, что в данном материале процессы кристаллизации происходят очень быстро, и выбранные в эксперименте скорости охлаждения не позволяют повлиять на его степень кристалличности. Для ПЭТФ, напротив, разница заметна, поскольку на кривой нагрева, после более быстрого охлаждения, присутствует тепловой эффект, характерный для процесса улучшения кристаллической структуры. Это указывает на то, что при более быстром охлаждении процессы кристаллизации в ПЭТФ не успевают завершиться, и в твердом состоянии данный материал имеет в основном аморфную структуру.

Библиографический список

1. Шах В. Справочное руководство по испытаниям пластмасс и анализу причин их разрушения. – СПб.: Научные основы и технологии, 2009. – 732 с.
2. Емелина А.Л. Дифференциальная сканирующая калориметрия. – М.: Изд-во Лаборатория хим. фак-та МГУ, 2009. – 42 с.

Сведения об авторах

Тягло Алексей Андреевич – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КТЭИ-14-1б, г. Пермь, e-mail: leksus990@rambler.ru

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

А.Э. Файзуллин, Н.М. Труфанова

АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В НЕФТЯНОЙ СКВАЖИНЕ

В данной работе была разработана математическая модель процессов теплопереноса нефти в вертикальной скважине, рассмотрено распределение температуры по длине нефтяной скважины и исследовано влияние различных факторов на температурный режим работы скважины. Также проведено сравнение плоской и осесимметричной задачи.

Ключевые слова: нефтяная скважина, численные методы, теплоперенос, дебит, температурное поле.

A.E. Faizullin, N.M. Trufanova

ANALYSIS OF THERMAL PROCESSES IN AN OIL WELL

In this article was developed a mathematical model of the processes of heat and mass transfer of oil in a vertical well, was considered the temperature distribution along the length of the oil well and was investigated the influence of various factors on the temperature regime of the well. We also compared the plane and axisymmetric problems.

Keywords: oil well, numerical methods, heat and mass transfer, flow rate, temperature field.

Одной из самых больших проблем в нефтяной отрасли является выпадение парафиновых отложений на внутренних поверхностях стенок труб, по которым движется нефтяная жидкость. Решение задачи по предотвращению формирования асфальтосмолопарафиновых отложений позволяет снизить текущие и капитальные затраты в технологии нефтедобычи. Для этого нужно поддерживать температуру в нефтяной скважине выше температуры выпадения парафиновых отложений. В данной работе температура выпадения парафина принималась равной 40 °С.

Постановка задачи. Рассматриваем продольное сечение глубиной 2000 м. Конструкция скважины изображена на рис. 1.

Математическая модель движения и теплопереноса в нефтяной скважине основывается на законах сохранения массы, количества движения и энергии. Были приняты следующие допущения: задача

осесимметричная, стационарная, течение ламинарное, теплофизические свойства твердых материалов и нефтяной жидкости не зависят от температуры, бесконечный массив земли заменен ограниченной областью, нефтяная жидкость – однородная среда.

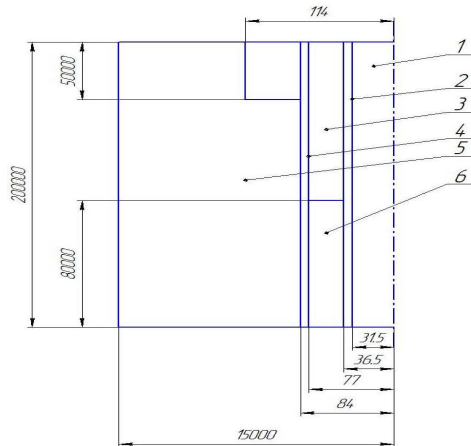


Рис. 1. Конструкция нефтяной скважины: 1 – нефтяная жидкость, которая добывается насосно-компрессорной трубой; 2 – насосно-компрессорная труба; 3 – воздух в затрубном пространстве; 4 – обсадная колонна; 5 – грунт, окружающий скважину; 6 – нефтяная жидкость, в затрубном пространстве

С учетом сделанных допущений система дифференциальных уравнений имеет вид:

– уравнения движения:

$$\rho(U_x \frac{\partial U_x}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_x}{\partial y}) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 U_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_x}{\partial y^2} \right), \quad (1)$$

$$\rho(U_x \frac{\partial U_y}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_y}{\partial y}) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 U_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_y}{\partial y^2} \right); \quad (2)$$

– уравнение теплопроводности для нефтяной жидкости:

$$\rho c \left(U_x \frac{\partial T}{\partial x} + U_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda_H \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + q_v; \quad (3)$$

– уравнение теплопроводности для твердых элементов конструкции скважины и воздуха:

$$\lambda_i \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) = 0, \quad (4)$$

где x, y – декартовы координаты; U_x, U_y – компоненты вектора скорости нефти в насосно-компрессорной трубе; t – температура, °C; P – отклонения давления воздуха от гироскопического; ρ, μ – плотность и вязкость нефти; q_v – мощность внутреннего диссипативного источника тепла; λ_i – теплопроводность материалов (грунт, цемент, сталь, нефть, воздух).

Система дифференциальных уравнений (1)–(4) замыкается следующими граничными условиями (рис. 2).

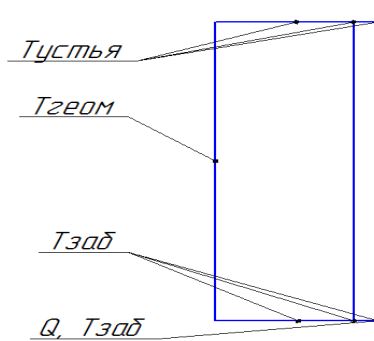


Рис. 2. Граничные условия

На границе раздела разнородных сред задали равенство тепловых потоков и температур:

$$T|_n = T|_{n+1}, \quad (5)$$

$$\lambda_n \frac{\partial T^{(n)}}{\partial x} = \lambda_{n+1} \frac{\partial T^{(n+1)}}{\partial x}. \quad (6)$$

На границе массива земли, окружающего скважину, задали температуру, соответствующую геотерме:

$$T|_{\text{гр. зем}} = T(h). \quad (7)$$

В забое скважины задали температуру забоя ($T = 57^\circ\text{C}$) и расход через столб насосно-компрессорной трубы (20 т/сут):

$$T|_{h=2000} = T_{\text{забоя}} = 57^\circ\text{C}, \quad (8)$$

$$Q|_{h=0} = Q|_{h=2000} = 20 \frac{\text{т}}{\text{сут}}. \quad (9)$$

Температура на поверхности земли равна $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$,

$$T|_{h=0} = T|_{\text{устья}} = -3\text{ }^{\circ}\text{C}. \quad (10)$$

Свойства конструктивных элементов

Материал	Плотность ρ , кг/м ³	Теплоемкость C , Дж/(кг $\cdot$ К)	Теплопроводность λ Вт/(м $\cdot$ К)	Вязкость μ кг/(м $\cdot$ с)
Грунт	1900	1680	1,82	-
Цемент	1400	900	0,85	-
Сталь	8030	502,48	16,27	-
Нефть	743,5	2000	0,15	0,4416
Воздух	1,225	1006,43	0,0242	1,78e-05

Результаты исследования. В данной работе сделано исследование влияния температуры забоя и дебита на распределение температуры скважины. Также было проведено сравнение плоской и осесимметричной задачи. В результате были получены распределения температур нефтяной жидкости по глубине скважины, которая добывается насосно-компрессорной трубой. Задача решалась численно, методом конечных элементов. Для расчетов использовалась среда инженерных расчетов ANSYS Fluent (рис. 3).

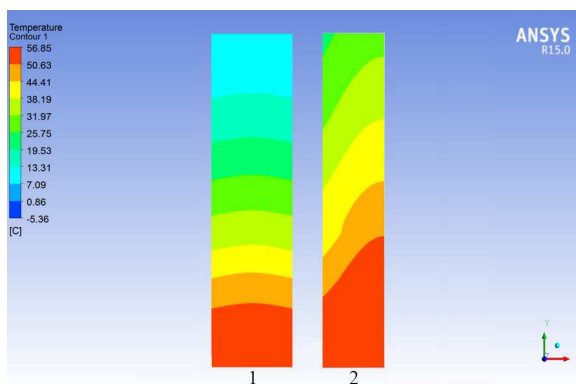


Рис. 3. Температурное поле скважины при различной постановке задачи: 1 – плоская постановка задачи; 2 – осесимметричная постановка задачи

На рис. 4 приведено решение плоской и осесимметричной задачи тепломассообмена. Видно, что температура на устье скважины при плоской постановке задачи на $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ меньше, чем при осесимметричной по-

становке задачи. Это является существенным превышением, поскольку длина участка выпадения парафина на стенке насосно-компрессорной трубы при плоской постановке задачи больше на 19,2 %.

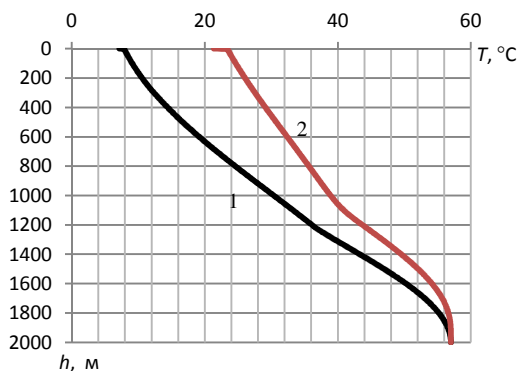


Рис. 4. Распределение температур в центре скважины по глубине для скважин с различной постановкой задачи: 1 – кривая, полученная при плоской задаче; 2 – кривая, полученная при осесимметричной задаче

На рис. 5 можно увидеть, что с увеличением дебита температура в нефтяной скважине увеличивается. Это объясняется тем, что нефтяная жидкость не успевает сильно охладиться, так как возрастает скорость движения нефтяной жидкости с увеличением дебита.

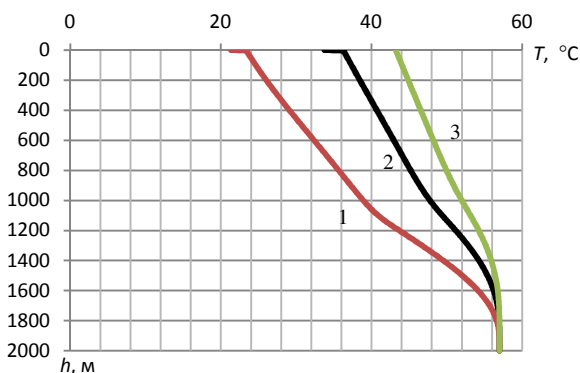


Рис. 5. Распределение температур в центре скважины по глубине для скважин с различным дебитом: 1 – кривая, полученная при дебите 20 т/сут; 2 – кривая, полученная при дебите 40 т/сут; 3 – кривая, полученная при дебите 60 т/сут

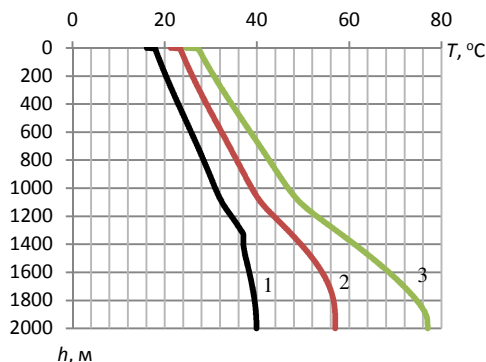


Рис. 6. Распределение температур в центре скважины по глубине для скважин с различной температурой забоя: 1 – кривая, полученная при температуре забоя 37 °C; 2 – кривая, полученная при температуре забоя 57 °C; 3 – кривая, полученная при температуре забоя 77 °C

На рис. 6 мы видим, что температура на забое влияет на распределение температуры в нефтяной скважине.

Библиографический список

1. Персиянцев М.Н. Добыча нефти в осложненных условиях. – М.: Недра-Бизнесцентр, 2000. – 653 с.
2. Сорокин С.А., Хавкин С.А. Особенности физико-химического механизма образования АСПО в скважинах // Бурение и нефть. – 2007. – № 10. – С. 30–31.
3. Tarom N., Hossain M.M. Using ANSYS to Realize a Semi-Analytical Method for Predicting Temperature Profile in Injection/Production Well // World Academy of Science, Engineering and Technology. – 2012. – № 72.
4. Ramey H.J.Jr. Wellbore heat transmission // Journal of Petroleum Technology. – 1962. – Vol. 14(4). – P. 427–435.
5. Труфанова Н.М. Переработка полимеров: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2009. – 159 с.

Сведения об авторах

Файзуллин Артур Эдгарович – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. МЭ-14-16, г. Пермь, e-mail: artur96.07@mail.ru.

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

Ю.М. Хасянова, Е.В. Субботин

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ ПРЕБЫВАНИЯ ПОЛИМЕРА В ВИНТОВОМ КАНАЛЕ ОДНОШНЕКОВОГО ЭКСТРУДЕРА

В работе проведены численные исследования по определению распределения времени пребывания нагревостойких полимерных композиций в винтовом канале одношнекового экструдера. Исследования проводились для экструдера с кабельной головкой и открытым выходом. Построены зависимости распределения продольной компоненты скорости по высоте канала экструдера, распределения времени пребывания расплава полимера в зоне дозирования и зависимость минимального и максимального времени пребывания расплава полимера от скорости вращения шнека.

Ключевые слова: нагревостойкие полимерные композиции, экструзия, численное исследование, распределение времени пребывания.

Yu.M. Hasyanova, E.V. Subbotin

NUMERICAL STUDY OF DISTRIBUTION OF RESIDENCE TIME OF THE POLYMER IN THE SCREW CHANNEL OF A SINGLE SCREW EXTRUDER

In this paper, numerical studies to determine the residence time distribution of heat-resistant polymer compositions in the screw channel of a single-screw extruder are carried out. The research was carried out for an extruder with a cable head and an open output. The dependences, distributions of the longitudinal component of the velocity along the height of the extruder channel, distributions of the residence time of the polymer melt in the dosing zone and the dependence of the minimum and maximum residence time of the polymer melt on the rotation speed of the screw are constructed.

Keywords: heat resistance polymer compositions, extrusion, numerical study, distribution of stay time.

В настоящее время особый интерес при переработке полимерных материалов представляет распределение времени пребывания полимерного материала в одношнековом экструдере, которое наряду с температурой может оказать существенное влияние на эксплуатационные характеристики готового изделия. В данной работе с помощью математического моделирования [1] проводилось численное исследование процессов тепломассопереноса нагревостойких полимеров в зоне дозирования одношнекового экструдера.

Численные исследования проводилось для экструдера с классической геометрией шнека диаметром 45 мм, подробные данные представлены в табл. 1. Реологические и теплофизические свойства для перерабатываемого материала полиэфирэфиркетона (РЕЕК) представлены в табл. 2.

Таблица 1

Геометрия одношнекового экструдера

Внутренний диаметр цилиндра (корпуса) D , мм	45,0
Наружный диаметр шнека, мм	44,8
Шаг винтовой нарезки, мм	45,0
Ширина канала W , мм	38,8
Ширина гребня винтовой нарезки S , мм	4,1
Длина геометрической зоны дозирования, витки	10
Глубина канала в зоне дозирования H_2 , мм	3
Угол подъема винтовой линии Θ , град	17,66°
Радиальный зазор между гребнем шнека и внутренней поверхностью корпуса, δ мм	0,1

Таблица 2

Реологические и теплофизические свойства полимера

Поли- мер	n	μ_0	T_0	β	T_{II}	ρ_s	ρ_m	λ_s	λ_m	C_s	C_m
	–	Па·с ^{n}	°C	1/°C	°C	кг/м ³		Вт/(м·°C)		Дж/(кг·°C)	
РЕЕК	0,72	1290	360	0,008	345	1320	1120	0,290	0,290	1550	1860

Температура на входе в зону дозирования принимается равной 365 градусов, температура цилиндра и шнека – 370 и 367 градусов соответственно. Остальные технологические параметры для различных вариантов расчетов представлены в табл. 3 и 4.

Таблица 3

Технологические параметры процесса
для экструдера с кабельной головкой

$N_{ш}$, об./мин	$T_{вх}$, °C	$T_{ш}$, °C	$T_{ц}$, °C	G_0 , кг/с
10	365	367	370	0,0009
20				0,0017
30				0,0025
40				0,0034
50				0,0042
60				0,0049

Таблица 4

Технологические параметры процесса для экструдера
с открытым выходом

$N_{ш}$, об./мин	$T_{вх}$, °C	$T_{ш}$, °C	$T_{из}$, °C	G_0 , кг/с
10	365	367	370	0,0013
60				0,0079

Численные исследования проводились с помощью программного комплекса ANSYS. Канал в зоне дозирования развернутый на плоскость разбивался на 380 000 элементов. В результате расчетов определяются поля скоростей, по которым рассчитывается траектория движения частицы, представленная на рис. 1.

Подобным образом для 60 траекторий, каждая из которых представляет небольшой объем, рассчитывается время пребывания. Затем производится группировка по временным интервалам и строится РВП.

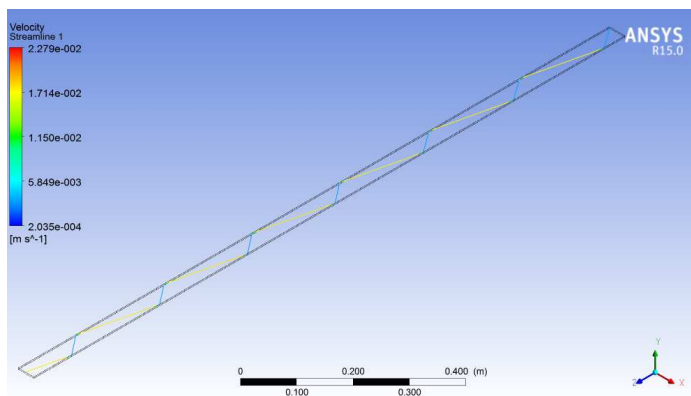


Рис. 1. Траектория движения частицы полимера

На рис. 2 и 3 представлены эпюры продольной компоненты скорости и распределение времени пребывания для экструдера с кабельной головкой и открытым выходом для 10 и 60 об/мин.

Сравнительный анализ полученных результатов показал, что с увеличением скорости вращения шнека происходит смещение РВП в область более низких временных значений, а его ширина, которая определяется как разница максимального и минимального времени пребывания, уменьшается.

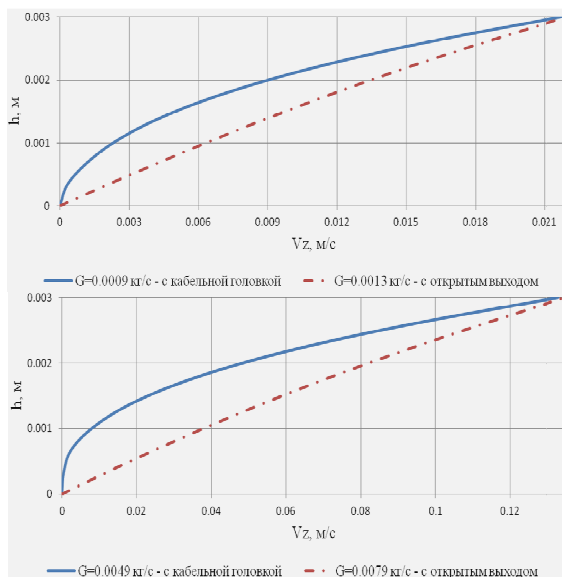


Рис. 2. Распределение продольной компоненты скорости по высоте канала экструдера для 10 и 60 об/мин

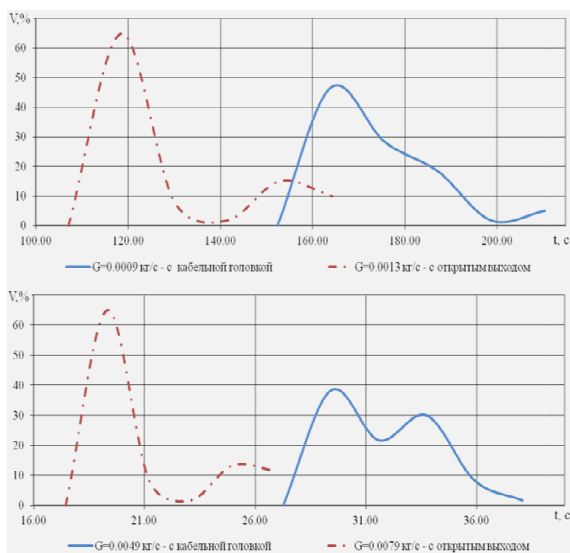


Рис. 3. Распределение времени пребывания расплава полимера в зоне дозирования для 10 и 60 об/мин

Также следует отметить, что сопротивление на выходе экструдера, зависящее от кабельной головки, в общем случае приводит к увеличению времени пребывания полимера в экструдере и увеличению ширины РВП.

На рис. 4 представлена зависимость ширины распределения времени пребывания от скорости вращения шнека. Видно, что данная зависимость носит нелинейный характер.

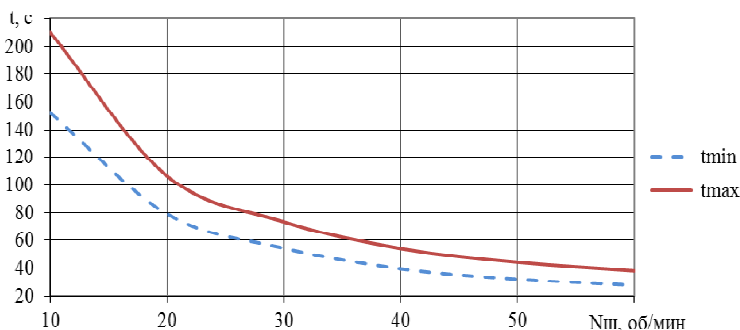


Рис. 4. Зависимость минимального и максимального времени пребывания расплава полимера в зоне дозирования от скорости вращения шнека для экструдера с кабельной головкой

Таким образом, вероятность возникновения термической деструкции перерабатываемого материала уменьшается за счет больших значений массового расхода и снижения сопротивления на выходе из экструдера, вносимого кабельной головкой. Проведение данных исследований будет иметь большое практическое значение для материалов, свойства которых могут существенно изменяться в условиях длительного температурного воздействия.

Библиографический список

1. Ершов С.В., Труфанова Н.М., Лукин М.Д. Численное исследование процессов течения расплава полимера в канале зоны дозирования и формирующем инструменте // Машиностроение, материаловедение. – 2017. – Т. 19, № 3. – С. 163–178.
2. Патанкар С.В. Численное решение задач теплопроводности и конвективного теплообмена при течении в каналах. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 312 с.

3. Смирнов Е.М., Зайцев Д.К. Метод конечных объемов в приложении к задачам гидрогазодинамики и теплообмена в областях сложной геометрии // Научно-технические ведомости СПбГТУ. – 2004. – № 2. – С. 70–81.

4. Торнер Р.В. Теоретические основы переработки полимеров (механика процессов). – М.: Химия, 1977. – 464 с.

Сведения об авторах

Хасянова Юлия Мансуровна – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КТЭ-16-1м, г. Пермь, e-mail: ymhasyanova@yandex.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.С. Шабловский, А.Е. Терлыч

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ИНДУКЦИОННОГО БЕСКОНТАКТНОГО СБОРА ДАННЫХ ОТ ДИСКРЕТНЫХ ДАТЧИКОВ

В настоящей статье исследовалось влияние частоты и расстояния на две магнитно-связные катушки. Построены зависимости коэффициента полезного действия системы от частоты.

Ключевые слова: катушка индуктивности, воздушный трансформатор, индукция, резонанс.

A.S. SHablovskij, A.E. Terlych

THE DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR CONTACTLESS INDUCTIVE DATA COLLECTION FROM DISCRETE SENSORS

In this article, the influence of frequency and distance on two magnetically coupled coils was studied. The graphs of the efficiency of the system on the resonant frequency are obtained.

Keywords: inductor, air transformer, induction, resonance.

В настоящее время возрастает интерес к передаче энергии и данных с помощью индукционных бесконтактных систем сбора данных (ИБССД). Машиностроение, бумажная и пищевая промышленность все больше автоматизируют производство, используя бесконтактные системы. Устройства, обеспечивающие беспроводную передачу, имеют ряд преимуществ: отсутствие скользящих контактов, гальваническая развязка, герметичность датчика, маленький размер по сравнению со скользящими контактами, отсутствие открытых токоведущих частей [3]. На рынке ИБССД доминируют европейские компании «Pepperl+Fuchs» и «Sick» [2]. В России нет компаний, производящих ИБССД. В литературных источниках практически отсутствуют публикации на тему расчета и конструирования таких систем.

Одна из задач разработки представляет собой поиск оптимальных параметров элементов и режимов работы индукционной системы передачи энергии. Система передачи энергии основана на эффекте электромагнитной индукции. Система состоит из первичной катушки (источника) и вторичной катушки (приемника). Катушки образуют систему с индуктивной связью. Переменный ток, протекая в обмотке первичной

катушки, создает магнитное поле, индуцирующее напряжение в приемной катушке, которое может питать необходимое оборудование. По мере удаления вторичной катушки от первичной все большая часть магнитного поля рассеивается и не достигает вторичной катушки [1].

Для исследования режимов работы индукционной системы передачи энергии была использована установка, показанная на рис. 1. В качестве задающего генератора использовался ШИМ-выход контроллера Atmega2560. Сигнал с генератора поступает на вход усилителя мощности U1, к выходу которого подключена LC цепочка передатчика. В цепи питания U1 находится миллиамперметр для определения потребляемой мощности. Цепочка L2C2 приемника подключена к выпрямителю, нагруженному на резистор R_H .

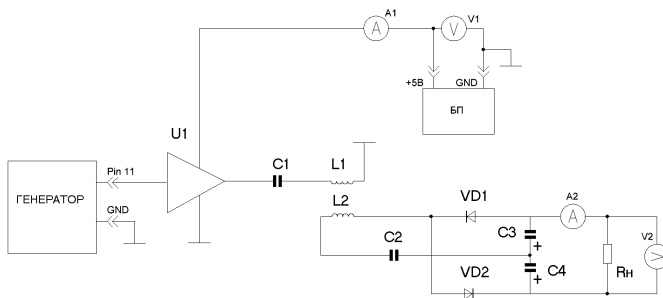


Рис. 1. Принципиальная схема индукционного датчика

Максимум передаваемой системой энергии соответствует некоторой резонансной частоте, зависящей от параметров связанных LC контуров:

$$W_p = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}, \quad (1)$$

где L – индуктивность катушки, C – емкость конденсатора.

В качестве связанных индуктивностей использованы серийные катушки RLB1314-103KL с величиной индуктивности 10 000 мкГн, размеры которых приведены на рис. 2.

В работе исследовалась эффективность передачи энергии η :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1},$$

где P_1 , P_2 – мощность в первичной и вторичной цепи соответственно. Эффективность передачи исследовалась для ряда рабочих резонансных частот путем изменения емкости конденсаторов C_1 и C_2 при различных расстояниях между катушками.

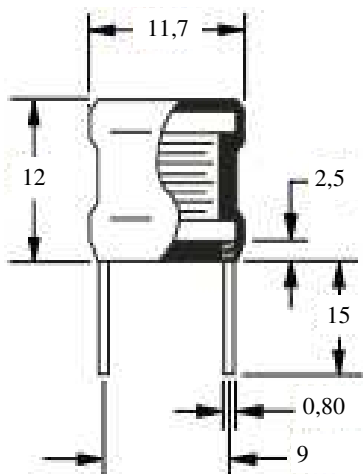


Рис. 2. Геометрические размеры катушки индуктивности RLB1314-103KL

Результаты исследования приведены в таблице.

Результаты исследования

F , кГц	P_1 , мВт	P_2 , мВт	η , %	Емкость конденсатора, C	Расстояние, мм
1,6	107	5,0	4,7	1 мкФ	2
4,8	71	6,5	9,2	114 нФ	
9,7	60,5	6,0	9,9	33 нФ	
40,2	20	0,2	1,3	1,3 нФ	
1,6	110	3,7	3,4	1 мкФ	4
4,8	77	4,5	5,8	114 нФ	
9,8	63,5	4,4	7,0	33 нФ	
40	25,5	0,1	0,2	1,3 нФ	

На рис. 2 показана зависимость эффективности передачи энергии от рабочей резонансной частоты. Видно, что η растет с ростом частоты, однако верхний предел частоты будет ограничен ростом потерь в магнитопроводе катушек.

Результаты исследования показывают, что на рабочих расстояниях порядка 5 мм может быть получена эффективность передачи энергии, близкая к 10 %.

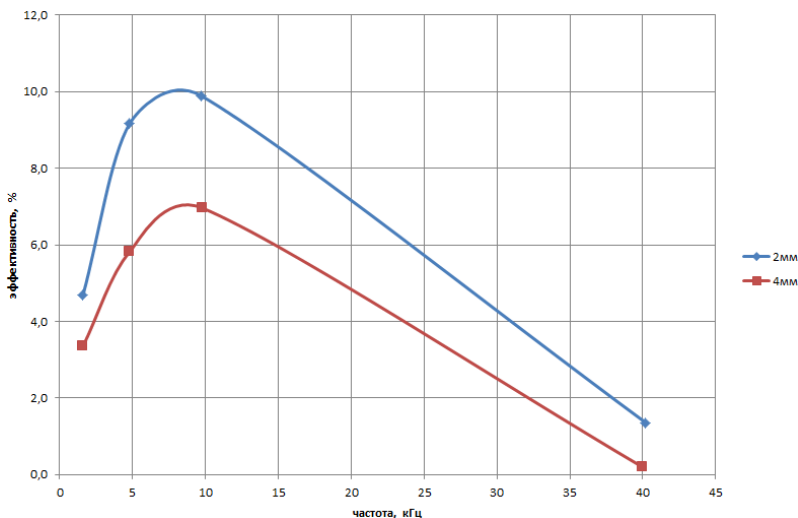


Рис. 4. Зависимость эффективности передачи энергии от резонансной частоты при различных расстояниях между катушками

Так, при потреблении передатчиком мощности порядка 1 Вт на грузки, подключаемые к приемнику, смогут получать порядка 0,1 Вт, что вполне приемлемо для питания экономичных датчиков.

Библиографический список

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. – М.: Юрайт, 2014.
2. WirelessPowerSpecification [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.wirelesspowerconsortium.com/downloads/wireless-powerspecification-part-1.html> (дата обращения: 09.05.2018).
3. Pepperl+Fuchs [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.pepperl-fuchs.com/russia/ru/index.htm> (дата обращения: 09.05.2018).

Сведения об авторах

Шабловский Антон Станиславович – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. МЭ-14-16, г. Пермь, e-mail: antshablov@gmail.com.

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

Секция IV
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

А.Г. Алейников

ОБМЕН ДАННЫМИ ПО НИЗКОВОЛЬТНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЦЕПИ ПИТАНИЯ

В данной статье описана проблема передачи данных по цепям питания. Предлагается и обосновывается использование дифференциальной цепи питания.

Ключевые слова: обмен данными, дифференциальная цепь питания, ВЧ-манипулирование.

A.G. Aleinikau

DATA EXCHANGE THROUGH THE DIFFERENTIAL LOW-VOLTAGE POWER CIRCUIT

This article describes the problem of data transmission by power circuits. The use of a differential power circuit is proposed and justified.

Keywords: data exchange, differential power circuit, HF manipulation.

В продолжение работы на тему: «Передача информации по низковольтной цепи питания», опубликованной мной на 52-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, где были оговорены основные проблемы выделения шин данных для обмена информацией между устройствами, описан принцип приёма-передачи данных по цепи питания и выполнена модель такой системы, предлагаю использовать вместо обычной цепи питания – дифференциальную [1]. Под «дифференциальной цепью питания» понимается витая пара, между обоими проводниками которой находится напряжение питания.

Использование именно дифференциальной цепи питания и передача сигнала по витой паре в противофазе освобождают от использования коаксиального кабеля, как было реализовано в системе с обычной цепью питания, и наделяют систему всеми преимуществами дифференциальной передачи сигналов. Данные мероприятия значительно удешевляют систему, упрощают её использование, но несколько усложняют её реализацию, так как теперь для передачи информации несущую информационного сигнала нужно сдвинуть по

фазе на 180 градусов. Таким образом, в системе образуются два противофазных сигнала, которые передаются по разным проводникам витой пары и тем самым компенсируют синфазные излучения друг друга [2]. Структурная схема такой системы приведена на рисунке.

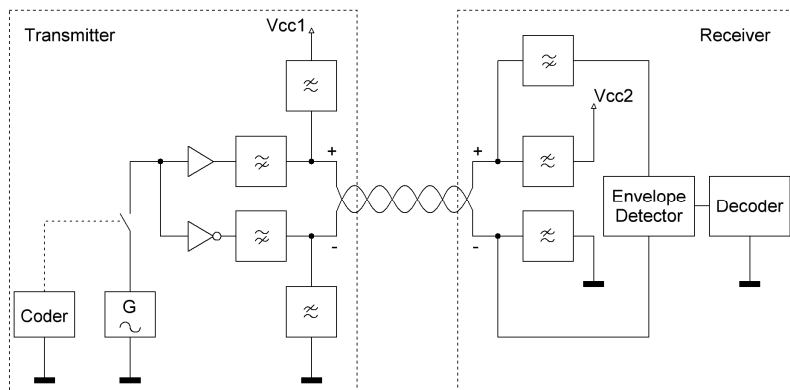


Рис. Структурная схема системы обмена данными по дифференциальной цепи питания

Высокочастотное колебание с генератора «G», управляемое блоком кодирования «Coder», которым может быть, например, микроконтроллер, подаётся на два усилителя, один из которых инверсный. Далее два противофазных сигнала, проходя через фильтры ВЧ, подаются в дифференциальную линию, находящуюся под постоянным напряжением «Vcc1», которое и является источником питания всей системы в целом. Фильтры НЧ, которые отделяют питание от дифференциальной линии, предназначены для предотвращения попадания высокочастотной составляющей в цепь питания передающего устройства.

Информационный сигнал в принимающей части схемы отделяется ВЧ-фильтром от постоянной составляющей, которая образуется из-за подведения питания по дифференциальной линии, и попадает на амплитудный детектор «Envelope Detector», где выделяется огибающая ВЧ-колебания и декодируется устройством «Decoder», которым также может быть микроконтроллер. Фильтры НЧ в принимающей части схемы так же, как и в передающей, «убирают» высокочастотную составляющую информационного сигнала из цепи питания принимающего устройства.

В дальнейшем разработка системы будет направлена на создание самостоятельного приёмо-передающего устройства, способного об-разовывать с другими такими же устройствами сетевое соединение.

Библиографический список

1. Алейников А.Г., Леванович А.М. Передача информации по низковольтной цепи питания // Материалы 52-й науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. – Минск, 2016.

2. Джонсон, Г., Грэхэм М. Высокоскоростная передача цифро-вых данных: высший курс черной магии. – М.: Вильямс, 2006.

Сведения об авторе

Алейников Андрей Геннадьевич – магистрант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, гр. 7М1621, г. Минск, e-mail: Andrey.aley95@mail.ru.

А.Г. Алейников

УЗЕЛ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СИГНАЛА ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ ПО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЦЕПИ ПИТАНИЯ

В данной статье рассмотрен один из методов преобразования сигнала для передачи информации по цепи питания, предъявлены требования к передающей части системы, приведены принципиальная схема, а также осциллограммы в некоторых важных точках схемы.

Ключевые слова: передача информации, дифференциальный сигнал, КМОП триггер.

A.G. Aleinikau

NODE OF SIGNAL TRANSFORMING FOR INFORMATION TRANSMISSION BY DIFFERENTIAL POWER CIRCUIT

In this article one of the methods for converting a signal to transmit information on a power circuit is considered. Requirements for the transmitting part of the system are presented. A schematic diagram and oscillograms in some important points of the circuit are presented.

Keywords: data exchange, differential signal, CMOS trigger.

Передача информации по цепи питания представляет большой интерес в системах, где выделение отдельной линии для обмена данными вызывает затруднения либо нецелесообразно, либо в принципе невозможно [1]. Преимущества использования дифференциального сигнала для передачи информации по цепи питания обуславливают три взаимосвязанных термина – помехозащищённость, скрытность и ЭМС. Структурная схема такой системы приведена в статье «Обмен данными по низковольтной дифференциальной цепи питания». Предлагаю подробнее рассмотреть передающую часть системы.

Предъявим требования к передающему узлу системы для дальнейшего удобного сравнения разных вариантов устройств по следующим критериям:

- потребляемая мощность;
- мощность выхода (сигнала);
- синфазный шум.

На рис. 1 приведена принципиальная схема передающей части устройства. Входной сигнал частотой 8 МГц подаётся на вход XP3. Резистивный делитель R6, R9 предназначен для подстройки амплитуды входного сигнала таким образом, чтобы скважность выходных дифференциальных импульсов была приближена к двум. На вход XP5 подаётся напряжение питания подключаемых устройств.

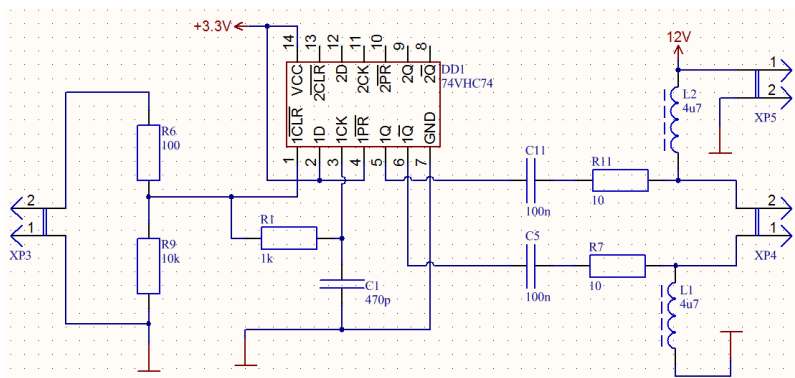


Рис. 1. Принципиальная схема передатчика

Принцип работы схемы заключается в том, что вход данных D-триггера всегда в единице, а линия тактирования и сброса управляется входным сигналом.

Таким образом, когда уровень входного сигнала больше порога срабатывания триггера, выход триггера 1Q принимает значение логической единицы, а инверсный выход – логического нуля. Когда уровень входного сигнала становится меньше порога срабатывания, выходы триггера принимают обратные значения. Следовательно, можно сразу предположить, что передатчик подобного типа будет иметь высокочастотную синфазную помеху, обусловленную временной задержкой между переключениями прямого и инверсного выходов триггера.

На рис. 2 представлена осциллограмма выходного сигнала, снятая с вывода XP4 относительно минуса питания. На осциллограмме показаны 3 сигнала: верхний – сигнал с плюса дифференциального питания, нижний – сигнал с минуса дифференциального питания,

средний – математическая функция сложения этих двух сигналов (синфазный сигнал). На осциллограмме видно, что передатчик «шумит» в эфир в момент переключения триггера.

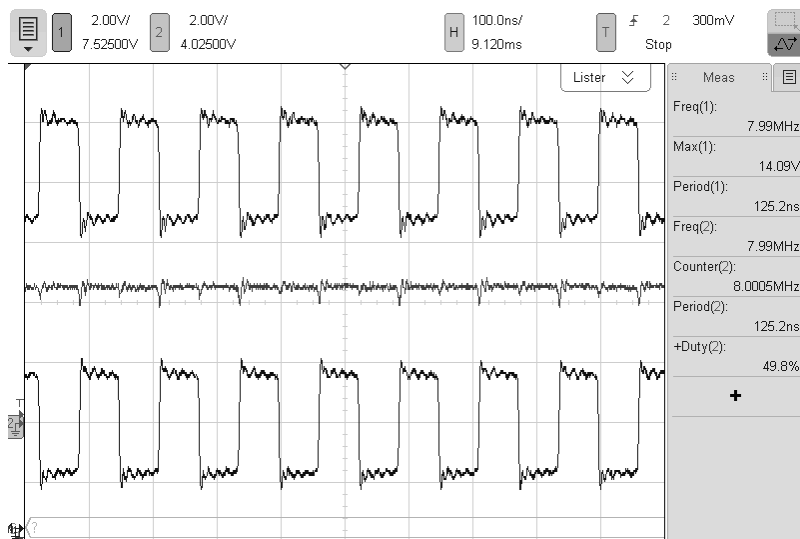


Рис. 2. Осциллограмма выходного сигнала без нагрузки



Рис. 3. Осциллограмма выходного сигнала с нагрузкой на кабель

Для проверки мощности выхода подключили к выходу передатчика провод, подключенный на нагрузку. В макете использовался провод марки КСПВ 2×0,5 длиной 80 м. Нагрузочное сопротивление составило 560 Ом. Использование обычного провода вместо дифференциального необходимо для тестирования устройства в условиях, приближенных к реальным.

Осциллограмма сигнала (рис. 3), снятая с вывода ХР4 после подключения нагрузки, показывает, что амплитуда сигнала уменьшилась и произошли изменения по фронтам сигнала. В любом случае сигнал остался дифференциальным, и даже уменьшилась амплитуда синфазных помех во время смены состояния сигнала.

Потребление схемы без подключения к кабелю варьируется в пределах 10 мА. При подключении к кабелю потребление возрастает на 10–20 мА в зависимости от длины кабеля. Дальнейшая разработка узла передатчика будет направлена на улучшение показателей по вышеприведённым критериям.

Библиографический список

1. Алейников А.Г., Леванович А.М. Передача информации по низковольтной цепи питания // Материалы 52-й науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. – Минск, 2016.
2. Джонсон Г., Грэхэм М. Высокоскоростная передача цифровых данных: высший курс черной магии. – М.: Вильямс, 2006.

Сведения об авторе

Алейников Андрей Геннадьевич – магистрант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, гр. 7М1621, г. Минск, e-mail: Andrey.aley95@mail.ru.

А.П. Даденкова, С.А. Даденков

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МОДЕЛИ ПРОТОКОЛА ПОИСКОВОГО СЕРВИСА DHT

В данной статье выполняется исследование модели децентрализованной файлообменной сети с протоколом DHT и предлагаются рекомендации по выбору значений параметров. В работе кратко описаны принципы функционирования поискового протокола, предложены фрагменты реализации его модели в среде имитационного моделирования AnyLogic. Проведены и представлены результаты экспериментов по исследованию протокола, и выполнен анализ результативности поиска данных файлообменной сети.

Ключевые слова: имитационное моделирование, протоколы поиска данных, децентрализованные файлообменные сети, AnyLogic, DHT, P2P.

A.P. Dadenkova, S.A. Dadenkov

INVESTIGATION OF CHARACTERISTICS OF THE DHT SEARCH SERVICE PROTOCOL MODEL

In this article, an analytical study of the decentralized file-sharing network with the DHT protocol and the conclusion of recommendations on the choice of parameters. The work discusses the general requirements, the proposed fragments of the implementation of its model in the simulation environment AnyLogic. The results of experiments on the investigation of the protocol and the performance analysis of the data retrieval of the file-exchange network are presented and presented.

Keywords: simulation modeling, data search protocols, decentralized file-sharing networks, AnyLogic, DHT, P2P.

Современный этап построения инфокоммуникационных сетей связи характеризуется широким применением peer-to-peer (P2P) технологий. Одной из распространенных областей применения технологии является построение файлообменных сетей. С увеличением масштабов сетей связи снижается эффективность применения традиционных централизованных архитектур и протоколов поиска информации. Это обусловлено высокой стоимостью централизованных систем хранения данных, низкой отказоустойчивостью, недостаточной пропускной способностью каналов связи для передачи и обработки больших объемов данных. Распространённость получают децентрализованные системы хранения и протоколы поиска данных и, в частности, протокол поиско-

вого сервиса DHT (Distributed Hash Table) [1, 2], получивший применение в таких сетях, как BitTorrent, I2P, ONEnet и других. Недостаточность исследования протокола, оценки влияния его параметров на результативность поиска данных обуславливают проблему эффективного функционирования децентрализованных файлообменных сетей. Это актуализирует проработку вопросов построения имитационной модели файлообменной сети с протоколом DHT и исследования влияния его параметров на результативность поиска и нагрузку на каналы связи.

DHT представляет собой протокол, предназначенный для организации поиска данных в P2P-сетях путем создания распределенного индекса всех имеющихся файлов. Особенность протокола заключается в возможности распределения информации среди некоторого набора узлов P2P-сети [2, 3] таким образом, что каждый участвующий узел, имея специальную хеш-таблицу ассоциативных записей идентификаторов (ключей) и адресов других узлов сети, смог бы найти искомые данные, связанные с ключами сети (идентификаторами других узлов). Ответственность за поддержание связей распределяется между узлами, что обеспечивает простое масштабирование сети.

Основу работы протокола DHT составляют процедуры подключения пользователей, поиска, размещения и распространения информации в сети.

Подключение нового пользователя к сети означает [2]: 1) выбор уникального 160-битного идентификатора *hashID* (используется хеш-функция SHA-1); 2) заполнение и сортировку (по возрастанию) DHT-таблицы случайными существующими в сети идентификаторами узлов и соответствующими адресами (IP:port). Заполнение DHT-таблицы выполняется в несколько итераций, до формирования в ней минимального числа v записей. Итерация представляет собой запрос к DHT-таблице случайного узла сети на получение случайного набора k записей (корзины таблицы, первый элемент которой представляет ключ корзины) и добавление полученных идентификаторов в заполняемую таблицу. Первая итерация представляет собой запрос к серверу-координатору, а последующие – к вновь добавленным в таблицу узлам. Размещение и поиск данных в сети осуществляются на основе уникального идентификатора информационной раздачи *infoHash*. Процедура размещения владельцем данных в сети предполагает осуществление поиска m «представителей» его данных, которые будут знать о наличии у него определенной информации. Цель поиска состоит

в нахождении в сети узлов с идентификаторами *hashID*, наиболее близкими к *infoHash*. Таким образом, пользователи могут найти владельца данных через его представителей. Поиск представителей производится за определенное число q итераций (глубина поиска). Итерации аналогичны этапам заполнения DHT-таблицы, но отличаются адресатом запроса и искомой информацией. Каждая итерация включает [2]:

- 1) поиск в DHT-таблице узла корзины идентификаторов наиболее близкой (наименьшее расстояние) к искомому *infoHash*;
- 2) формирование запроса к узлам корзины на получение от каждого из них k наиболее близких DHT-записей к искомому *infoHash*;
- 3) добавление новых записей в таблицу и сортировка. Процедура завершается выбором из DHT-таблицы узлов-представителей и передачи им идентификатора узла, раздающего данные и *infoHash* его данных.

Процедура поиска данных в сети аналогична процедуре размещения и сводится к итеративному поиску данных на узлах и заполнению DHT-таблицы потенциально новыми записями о *hashID* узлов, чьи адреса ближе всего к искомому *infoHash*. В процессе поиска опрашиваемые узлы сообщают пользователю о наличии у них искомой информации.

Построение имитационной модели файлообменной сети выполняется в системе объектного дискретно-событийного моделирования AnyLogic. Система моделирования позволяет учесть значимые параметры узлов сети, что обеспечивает корректность результатов моделирования.

Архитектура разработанной модели сети [4] имеет иерархическую структуру. Объектом верхнего уровня является сеть «DHT_Network», а вложенными: узлы класса «Node», сервер «Server». Элементами объекта «Сеть» являются: *arrayNodes* – популяция узлов сети; *server* – сервер файлообменной сети; *numberNodes* – количество узлов в сети; *nodeInfo* – узел сети, раздающий данные; *infoHash* – хэш искомого в сети данных; *depthSearch* – глубина поиска *infoHash* (число итераций); *sizeBucket* – размер корзины DHT-таблицы; *nodeSearch* – узел сети, ищущий данные; *numberCycles* – количество прогонов модели; *creatingNodesAndHashID* – функция создания узлов сети и назначения им уникальных *hashID*; *fillingTableDHT* – функция заполнения и сортировки DHT-таблиц; *createInfoHash* – функция выбора раздающего узла и создание *infoHash* искомого данных; *searchIndexBucket* – функция поиска индекса корзины DHT-таблицы узла *node*, ближайшей к *infoHash*; *searchDelegates* – функция назначения узлов-представителей *infoHash* в сети; *nodeSelection* –

функция выбора узла, выполняющего поиск данных; searchData – функция поиска данных. Элементами объекта «Узел» сети являются: hashID – хеш узла; DHT_Table – таблица хеш’эй узлов сети; minNumberEntries – минимальное число записей в таблице DHT; infoHash – хеш данных узла. Сервер содержит только коллекцию arrayIDs ассоциативных записей hashID и индексов соответствующих узлов сети.

Реализация алгоритма хеширования SHA-1 в модели осуществляется методами библиотеки org.apache.commons.codec.digest.DigestUtils подключенного распространенного пакета commons-codec-1.10.jar.

Для исследования модели протокола DHT и анализа результативности поиска принимаются следующие исходные данные: количество узлов в сети фиксировано и равно 50 000, количество записей в таблице фиксировано – 1000, значение глубины поиска варьируется в диапазоне [1..8] (эксперимент №1), значение размера корзины изменяется от 1 до 8 (эксперимент №2). Оценка эффективности работы протокола выполняется по характеристикам результативности нахождения данных и итоговой общесетевой нагрузке. Нагрузка на сеть определяется количеством поисковых запросов и ответов:

$$U = q \cdot (k + k^2). \quad (1)$$

Первый эксперимент состоит в изучении влияния глубины поиска на вероятность нахождения данных в сети (рис. 1). Моделирование проводится для значений размера корзины 4 и 8. Результаты оценки характеристик модели продемонстрированы на рис. 1. График содержит два различных участка изменения вероятности нахождения данных в сети: первый участок (при значениях глубины поиска от 1 до 5) характеризуется экспоненциальным ростом результативности поиска, а второй (глубина поиска >5) – отсутствием изменений.

Результаты характерны для произвольного размера корзины, что подтверждается моделированием. Это позволяет отметить рациональное значение глубины поиска, увеличение которого приводит к значительному росту нагрузки и малому влиянию на результативность поиска. Можно предположить, что рациональная глубина поиска определяется соотношением числа записей в DHT-таблице и числа узлов в сети (в рассматриваемом примере 1000/50000).

Второй эксперимент состоит в анализе влияния размера корзины на сетевую нагрузку и результативность поиска (рис. 2). Моделирование проводится при значениях глубины поиска 5 и 8 для подтвер-

ждения ранее сформулированной гипотезы рационального выбора глубины поиска. Результаты моделирования представлены в таблице и на рис. 2.

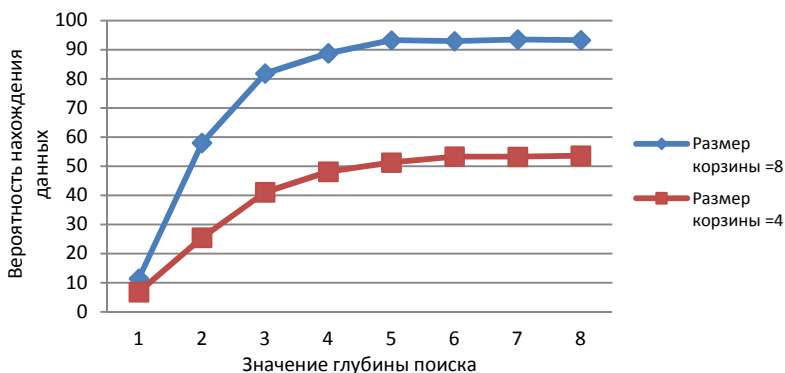


Рис. 1. График зависимости результативности поиска от глубины

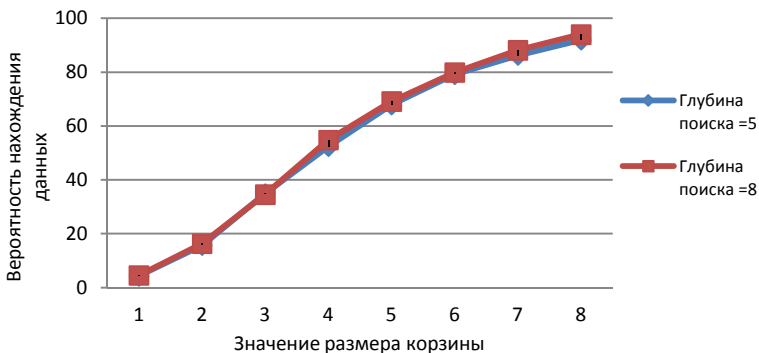


Рис. 2. График зависимости результативности поиска от размера корзины

Зависимость нагрузки на сеть от размера корзины и глубины поиска

Р. корзины	1	2	3	4	5	6	7	8
Глубина =5	10	30	60	100	150	210	280	360
Глубина=8	16	48	96	160	240	336	448	576

Сравнение результативности поиска в сети при различной глубине поиска показывает следующие результаты:

1. Значение глубины поиска выше рационального практически не влияет на вероятность нахождения данных;

2. Значение глубины поиска оказывает сильное влияние на сетевую нагрузку.

3. Увеличение размера корзины сопровождается линейным изменением результативности поиска.

Сформулированная гипотеза рационального выбора глубины поиска подтверждается, при этом данные эксперимента позволяют говорить о рациональном значении размера корзины. Учитывая возрастающую нагрузку на сеть, более эффективным является выбор меньшей глубины поиска. Таким образом, результаты эксперимента позволяют управлять сетевой нагрузкой изменением значения глубины поиска.

Дальнейшее исследование поискового протокола DHT предполагает выполнение количественной оценки и анализа результативности поиска информации в сети с различным числом узлов, записей DHT-таблицы, глубиной поиска и размером корзины. Конечной целью анализа является оптимизация характеристик поискового протокола для заданных параметров сети.

Библиографический список

1. Loewenstern A. DHT Protocol [Электронный ресурс]. – URL: http://www.bittorrent.org/beps/bep_0005.html (дата обращения: 03.05.2018).

2. Рабинович В.Е., Шестаков А.А. Способ управления трафиком в BitTorrent-сетях с помощью протокола DHT // Вестник СибГУТИ. – 2012. – № 3. – С. 3–10.

3. Сивашенко Д. Распределенные хэш-таблицы на примере NoSQL [Электронный ресурс]. – URL: <http://seminar.at.ispras.ru/wp-content/uploads/2010/11/Cassandra-and-DHT.pdf> (дата обращения: 03.05.2018).

4. Даденкова А.П. Построение модели файлообменной сети с протоколом DHT // Научно-технический вестник Поволжья. – 2017. – № 6. – С. 183–186.

Сведения об авторах

Даденкова Алёна Павловна – студентка Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ТК-14-16, г. Пермь, e-mail: dadenkova@yandex.ru.

Даденков Сергей Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: dadenkov@rambler.ru.

М.И. Норваткин, С.А. Тюрин

ОБЗОР И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ LPWAN СЕТЕЙ

В статье рассмотрены базовые технологии сетей дальнего радиуса действия LPWAN. Проведен сравнительный анализ технических характеристик данных технологий.

Ключевые слова: Интернет вещей, беспроводные сети, LPWAN, IoT, LoRaWAN, SIGFOX, «СТРИЖ».

M.I. Norvatkin, S.A. Tyurin

OVERVIEW AND COMPARATIVE ANALYSIS OF LPWAN NETWORK

In article the basic networking long range LPWAN. Comparative analysis of technical characteristics of these technologies.

Keywords: Internet of Things, wireless networks, LPWAN, IoT, LoRaWAN, SIGFOX, «STRIJ».

Введение. Интернет вещей (IoT) в ближайшие пять лет будет базироваться на эффективных беспроводных технологиях, позволяющих дешево объединить в сеть множество устройств на большой территории. Поэтому для инициаторов абсолютного большинства масштабных IoT-проектов критически важным становится выбор стандарта связи для разворачивания собственной сети.

В данной статье будут рассмотрены основные технологии с низким энергопотреблением и большим охватом, LPWAN-технологии в нелицензируемом диапазоне, которые имеют перспективы развития в РФ.

Технология SigFox. SIGFOX является частной компанией, которая направлена на создание всемирной сети, специально разработанной для устройств (Internet of Things, IoT). Технология позволяет осуществлять передачу данных на большие расстояния при малой мощности передающего устройства и малой емкости батареи.

Сеть отлично подходит для простых и автономных устройств, которые посылают небольшое количество данных в эту сеть. Так, сеть SIGFOX похожа на сотовую инфраструктуру (GSM- и GPRS-3G-4G),

но является более энергоэффективной и в то же время менее затратной. SIGFOX использует ультраузкую полосу частот (Ultra Narrow Band, UNB) на основе радиотехнологии для подключения устройств к глобальной сети. Использование UNB – ключевой фактор в обеспечении очень низкого уровня мощности передатчика, который будет использоваться во время состояния поддержания соединения надежных данных. Сеть работает в существующих нелицензируемых диапазонах (The industrial, scientific and medical, ISM) в глобальном масштабе и сосуществует в этих частотах с другими радиотехнологиями без проблемы перекрытия сети или проблемы пропускной способности. В Европе широко используется диапазон 868,8 МГц (как определено в ETSI и CEPT), а в США 915 МГц (как определено FCC). Зона охвата сети SIGFOX составляет около 30–50 км в сельской местности и в городских районах. Обычно, где больше затруднений и шума, диапазон снижается в пределах от 3 до 10 км.

Технология использует шифрование AES с HMACs с закрытым ключом, который встроен в прибор, плюс некоторый порядковый номер. Технология SIGFOX направлена на низкую стоимость устройств, где требуется широкая зона покрытия [1].

Технология LoRaWAN. LoRaWAN – стандарт протокола LPWAN, работающий в технологической среде LoRa. LoRa – это тип модуляции для связи IoT. LoRa не является сотовым стандартом. Для работы LoRaWAN не требуется получения лицензий на использование частот.

LoRa использует LoRaWAN-MAC протокол канального уровня (OSI media layer 2) для сетей с множеством узлов с большим радиусом действия и низким энергопотреблением.

Оборудование в сети LoRaWAN работает так. Асинхронная отправка данных подразумевает передачу данных только тогда, когда эти данные есть. Пока устройству нечего передавать, оно «спит», экономя энергию. Специалисты могут задать отправку данных по расписанию или вне зависимости от времени.

В архитектуре LoRa синхронизация с сетью не требуется. В асинхронных диапазонах только природа конечного приложения определяет, как долго устройство может «спать». Следовательно, это помогает сохранить заряд батареи.

Средняя скорость передачи данных в сетях LoRaWAN – от 300 бит/с до 50 Кбит/с. Для большинства случаев использования уст-

роЙствам LoRaWAN вполне достаточно скорости передачи данных в 11 кБит/с.

Требования к пропускной способности сигнала, обозначенные 3GPP, составляют 125 КГц. LoRa использует метод модуляции с расширением спектра и вариацией линейной частотной модуляции. Применение широкополосной кодовой манипуляции LoRaWAN приводит к снижению эффективности использования частотного спектра. Разделение каналов осуществляется по средствам CDMA и TDMA.

Преимущество LoRa заключается в использовании ячеистых (многоточечных) сетей. Устройства могут работать, как радиорелейная станция, и передавать сигнал до ближайшей точки доступа. Поэтому у провайдеров нет необходимости устанавливать дополнительные точки доступа с проводкой к ним. Альтернативный путь – использование миниатюрных радиорелейных станций WLAN, которые обеспечивают связь с имеющейся инфраструктурой точек доступа.

LoRaWAN может обслуживать устройства класса A, B, C. Классы отличаются по расписанию передачи данных в эфир.

LoRaWAN не полагается на мобильные данные, и ее покрытие остается относительно устойчивым вне зависимости от условий местности. Более низкие инвестиции, необходимые для LoRa, в значительной степени действуют в ее пользу.

LoRa считается идеальной для приложений и устройств, которые не требовательны к скоростям передачи данных и количеству отправляемых данных. Однако устройства должны обеспечивать длительный срок службы батареи при минимальных затратах на техническое обслуживание.

Данная технология может использоваться как операторами, работающими в сфере мобильной связи, так и не имеющими отношения к этой сфере. Общая стоимость модулей LoRaWAN составляет примерно в \$8-\$10, что в два раза дешевле модулей LTE, таких как NB-IoT. Затраты на новое развертывание LoRaWAN гораздо ниже, чем на строительство NB-IoT с нуля [2].

Технология «СТРИЖ». Решение «СТРИЖ» для Интернета вещей включает в себя все уровни модели OSI – от физического(PHY) до прикладного(APP). Система является отечественной разработкой, в основе технологии лежит собственный узкополосный энергоэффективный радиопrotocol, оптимизированный для межмашинного обмена данными на больших расстояниях.

«Стриж» использует сверхузкополосный сигнал, ширина канала передающего устройства составляет 50 Гц, при минимальном бит-рейте в 50 бит/с. Узкополосный сигнал в 50 Гц и высокая энергетика на каждый бит передаваемой информации обеспечивают хороший энергетический потенциал канала связи (link budget) в 176 дБм и высокую помехоустойчивость.

«Стриж» в 500 кГц, имея ширину канала в 100 Гц, выделяет 5000 каналов для одновременной работы в заданном районе. 5000 устройств могут одновременно выходить в эфир без риска коллизий и потери сигнала. «Стриж» поддерживает устройства класса А, В, С. Классы отличаются по расписанию передачи данных в эфир. Например, оборудование класса А передает информацию, а затем короткий промежуток времени ожидает ответа от базовой станции. Приемник выключается до следующего сеанса связи. Устройства класса В работают по расписанию. Передатчик включается в заданное время. Базовая станция располагает этим расписанием, поэтому способна передавать данные на устройство в соответствии с графиком. Устройства класса С держат приемник включенным постоянно, поэтому базовая станция может в любое время передать информацию [3].

Сравнение технологий сетей дальнего радиуса действия LPWAN. Сравнение технологий сетей дальнего радиуса действия представлены в таблице. Как видно из таблицы, технологии обладают высокой дальностью связи, повышенной помехозащищенностью, низкой скоростью передачи данных, низким энергопотреблением и, как следствие, высокой степенью автономности конечных устройств.

Сравнение характеристик LPWAN-технологий

Характеристики	«СТРИЖ»	LoRa	SIGFOX
Метод модуляции	DBPSK	DSSS	-
Диапазон	–	ISM	ISM
Ширина полосы канала передающего устройства	50/100/1000 Гц	125 кГц	100 кГц
Эффективность использования спектра	Высокая	Низкая	Низкая
Скорость передачи данных	50/10/1000 бит/с	0,3 – 50 кбит/с	100 бит/с
Частота	868,8 МГц	868,8 МГц	868,8 МГц
Шифрование	ГОСТ 34.12-2005/AES128	AES128	AES128 с HMACs
Дальность	До 10 км в городе	До 2,5 км в городе	До 10 км в городе

Сравнительный анализ выявил, что у каждой технологии имеется множество преимуществ и особенностей, и ни один вышерассмотренный вариант не может быть оставлен в стороне и имеет место в современном мире технологий. На мой взгляд, на территории РФ «Стриж» имеет некоторые преимущества. LoRa разрабатывалась с учетом наличия широкого диапазона свободного радиочастотного спектра. В условиях РФ LoRa может работать с 2 каналами, этого явно недостаточно. Однако важно подчеркнуть, что их достаточно сложно сравнивать: «Стриж» – это инструмент для работы, а два других примера – стандарты, по которым подобные инструменты и работают.

Библиографический список

1. SigFox [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.sigfox.com/en> (дата обращения: 10.05.2018).
2. LoRaWAN против NB-IoT: сравнение стандартов [Электронный ресурс]. – URL: <https://iot.ru/promyshlennost/lorawan-protiv-nb-iot-sravnenie-standartov> (дата обращения: 10.05.2018).
3. Сравнение технологий «СТРИЖ» и LoRa [Электронный ресурс]. – URL: <https://strij.tech> (дата обращения: 10.05.2018).

Сведения об авторах

Норваткин Максим Иванович – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ТК4-16-1м, г. Пермь, e-mail: norvatkin_maksim@mail.ru.

Тюрин Сергей Александрович – старший преподаватель кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: tiurinsa@yandex.ru.

А.К. Стафеев, С.А. Тюрин

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОТОКОЛОВ МАРШРУТИЗАЦИИ В СЕТЯХ MANET

Многошаговые беспроводные сети являются перспективным направлением информационно-коммуникационных сетей. Основной проблемой исследования характеристик предлагаемых в этой области решений является дороговизна натурных экспериментов. Поэтому основным средством тестирования разработанных протоколов передачи данных и оборудования является имитационное моделирование. В данной статье приведены результаты моделирования протоколов DSDV и OLSR.

Ключевые слова: многошаговые беспроводные сети, MANET, NS-3, протокол DSDV, протокол OLSR.

A.K. Stafeev, S.A. Tyurin

ANALYSIS OF EFFICIENCY ROUTING PROTOCOLS IN NETWORKS MANET

Multihop wireless networks are a promising area of information and communication networks. The high cost of full-scale experiments is the main problem of solutions evaluating offered in this area. Therefore, the main testing tool of developed communication protocols and equipment is a simulation. This article presents the results of simulation DSDV and OLSR protocols.

Keywords: multihop wireless networks, MANET, NS-3, DSDV routing protocol, OLSR routing protocol.

Введение. Сети MANET отличаются следующими особенностями:

- 1) возможность передачи данных на большие расстояния без увеличения мощности передатчика;
- 2) устойчивость к изменениям в топологии сети;
- 3) высокая скорость развертывания.

Мобильность узлов ведет к дополнительному повышению динамичности топологии сети, поскольку вследствие помех или включения/выключения узла к возможности обрыва связи добавляется вероятность перемещения узлов. Это обстоятельство осложняет использование протоколов маршрутизации, используемых в проводных сетях. За последнее время немало исследований было посвящено маршрутизации в сетях MANET, что обусловлено необходимостью поиска наи-

более эффективного протокола маршрутизации для данных сетей. Целью данной работы является анализ эффективности двух *широко известных проактивных протоколов маршрутизации DSDV и OLSR*.

Сетевой симулятор NS3 является мощным сетевым симулятором для моделирования телекоммуникационных систем и распространяется под лицензией GNU GPLv2. Симулятор решает одну из главных проблем моделирования сетей – проблему стоимости оборудования. Применение имитационного моделирования позволяет проводить эксперименты, не разворачивая реальную сеть, что является трудоемким и дорогостоящим процессом. В NS3 разработаны модели беспроводных сетей различных типов, позволяющие проводить моделирование с движущимися объектами в трёхмерном пространстве. Кроме того, реализованы модели проводных и смешанных топологий различной сложности, в том числе Mesh-сетей на основе стека протоколов 802.11s. Симулятор «по умолчанию» не имеет собственного графического интерфейса, однако используются такие средства, как NetAnimator и PyViz, позволяющие выводить схему на экран для наблюдения за работой протокола [1].

Условия моделирования. В данной работе была смоделирована сеть MANET, использовались протоколы DSDV и OLSR. Для этой цели применялся симулятор беспроводных сетей NS-3.26, который моделирует многоступенчатую беспроводную ad-hoc систему и MAC-уровень. В ходе эксперимента использовались два переменных параметра сети, а именно размер пакета и скорость узлов. В качестве метрики производительности использовался коэффициент доставки пакетов. Параметры моделирования указаны в табл. 1.

Таблица 1

Параметры моделирования

Симулятор	NS-3.26
Протокол маршрутизации	DSDV и OLSR
Мощность передатчика	7.5 дБм
MAC-уровень	WiFi 2 Мб/с (802.11b)
Количество узлов	50
Время моделирования	100 с
Размер сети	300×1500 м
Модель мобильности	Случайная
Тип трафика	Постоянный битрейт (CBR)
Размер пакета	128, 512, 1024 байт
Скорость узлов	5, 10, 15 м/с

Результаты моделирования. Протокол OLSR использует концепцию многоточечных ретрансляторов (MPR). В пересылке информации о топологии участвуют только MPR-узлы, остальные узлы принимают и обрабатывают такие пакеты, но не пересылают их дальше. Каждый узел выбирает из множества своих одношаговых соседей, с которыми установлено двунаправленное соединение, MPR-ретрансляторы таким образом, чтобы каждый двухшаговый сосед данного узла являлся одношаговым соседом, по крайней мере, одного из его MPR-ретрансляторов (рис. 1) [2].

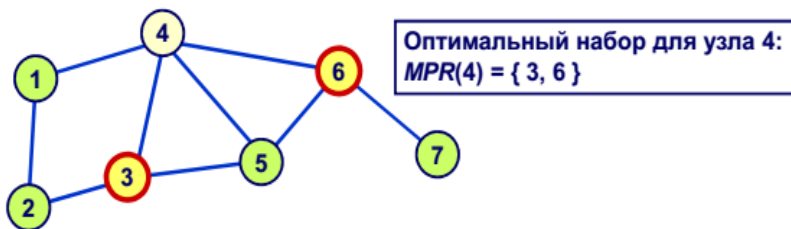


Рис. 1. Многоточечные ретрансляторы

Протокол DSDV использует широковещательный обмен таблицами маршрутизации. Каждый узел составляет таблицу маршрутизации, в которой хранятся данные обо всех доступных направлениях, количестве переходов от одного узла к другому до конечного пункта назначения и номере версии маршрута. Этими данными узел обменивается с соседями. Как только в маршрутной таблице узла происходят изменения (например, узел, находившийся в зоне радиовидимости, перестал отвечать на запросы), он инициализирует передачу маршрутной таблицы [3].

Результаты моделирования представлены в табл. 2 и 3. На основе результатов моделирования можно сделать вывод, что протокол OLSR более эффективен, чем протокол DSDV. Протокол OLSR обеспечивает больший коэффициент доставки пакетов во всех условиях моделирования, в особенности при увеличении размеров пакета или скорости перемещений узлов. Преимущество протокола DSDV – простота алгоритма.

Таблица 2

Коэф. доставки пакетов, DSDV

Скорость	Размер пакета		
	128 кБ	512 кБ	1024 кБ
5 м/с	77 %	70 %	61 %
10 м/с	78 %	67 %	63 %
15 м/с	70 %	63 %	54 %

Таблица 3

Коэф. доставки пакетов, OLSR

Скорость	Размер пакета		
	128 кБ	512 кБ	1024 кБ
5 м/с	97 %	88 %	83 %
10 м/с	96 %	90 %	80 %
15 м/с	94 %	89 %	82 %

На основе результатов моделирования построены графики зависимости коэффициента доставки от скорости перемещений узлов и размера пакета для обоих протоколов (рис. 2 и 3).

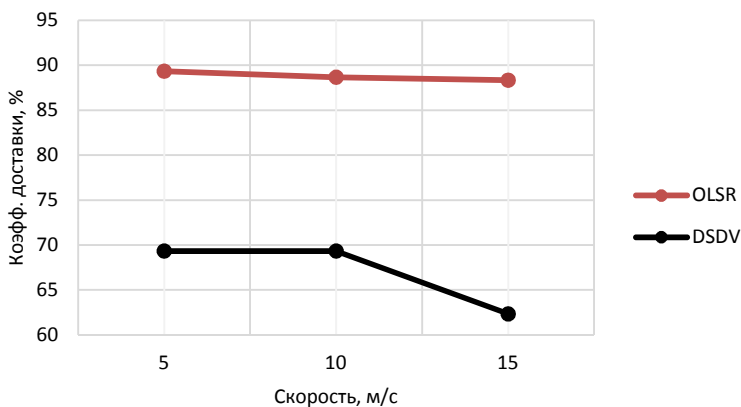


Рис. 2. График зависимости коэффициента доставки пакетов от скорости перемещения узлов

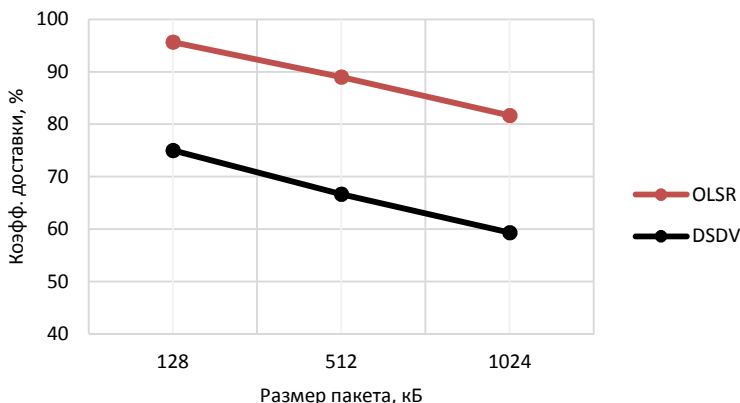


Рис. 3. График зависимости коэффициента доставки пакетов от размера пакет

Библиографический список

1. A Discrete-Event Network Simulator NS3 [Электронный ресурс] // URL: <https://www.nsnam.org/> (дата обращения: 20.04.2018).
2. RFC 3626. Optimized Link State Routing Protocol (OLSR) [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.ietf.org/rfc/rfc3626.txt> (дата обращения: 20.04.2018).
3. Perkins C.E., Pravin Bhagwat. Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers // SIGCOMM'94 Proceedings of the conference on Communications architectures, protocols and applications. – New York, 1994. – P. 234–244.

Сведения об авторах

Стафеев Александр Константинович – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ТК4-16-1м, г. Пермь, e-mail: stafa59@mail.ru.

Тюрин Сергей Александрович – старший преподаватель кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: tiurinsa@yandex.ru.

В.А. Щербакова, А.И. Гаранин, Ю.А. Конин

ОПТИЧЕСКОЕ РАЗРУШЕНИЕ ВОЛОКНА В ОПТОВОЛОКОННЫХ ЛИНИЯХ СВЯЗИ

В данной статье изучается эффект катастрофического разрушения волокна, входящего в состав оптических телекоммуникаций, исследуется возникновение эффекта в различных видах оптического волокна и предлагаются методы для его устранения.

Ключевые слова: лазер, оптическое волокно, телекоммуникации, эффект катастрофического разрушения волокна.

V.A. Shcherbakova, A.I. Garanin, Yu.A. Konin

OPTICAL FIBER DESTRUCTION IN OPTICAL FIBER TELECOMMUNICATIONS

In this article, this article investigates the effect of catastrophic destruction of fiber that is part of optical telecommunications, investigates the appearance of the effect in various types of optical fiber, and suggests methods for its elimination

Keywords: laser, optical fiber, telecommunications, fuse effect.

Введение. Увеличение пропускной способности волоконных оптических линий связи неизбежно приводит к повышению мощности излучения, распространяющегося по отдельному световоду. При этом поток мощности (интенсивность) лазерного излучения достигает $\approx 10^7 - 10^8$ Вт/см² [1]. При таких уровнях возникают нелинейные оптические эффекты, такие как вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна и четырехволновое смешение, которые могут ограничивать возможности волоконных систем. Но существует еще один эффект, который гораздо более очевидным способом ограничивает работу световодов. Это явление разрушения волоконных световодов под действием оптического излучения интенсивностью ≥ 1 МВт/см² (при условии дополнительного инициирования процесса). В зарубежной литературе оно обозначается как catastrophic damage (катастрофическое разрушение) или Fuse-effect. Второе обозначение можно перевести как «эффект плавления».

Впервые информация о разрушении одномодовых световодов на силикатной основе под действием оптического излучения была опубликована в 1987 г. [2]. Внешне явление выглядит следующим образом: если в одномодовый световод вводится лазерное излучение порядка 1 Вт, то при определенных условиях (при инициировании) в области сердцевины световода (масштаб порядка 1 мкм) возникает область яркого белого или голубоватого свечения (искра), которая движется навстречу лазерному излучению по световоду со скоростью порядка 1 м/с. В сердцевине световода после «пробегания» искры в большинстве случаев образуются микрополости (или пузыри, или каверны) размерами несколько микрометров, причем полости иногда могут формировать периодическую структуру вдоль сердцевины световода или сливаться в один длинный капилляр [3]. При этом волноводные свойства световода полностью разрушаются.

Явление поддерживается лазерным излучением мощностью всего лишь порядка 1 Вт. Процесс может быть инициирован разными способами, например, загрязнением торца световода, контактом торца световода с металлической поверхностью [4], нагреванием участка световода в электрической дуге. В любом случае, требуется нагрев участка волокна до температуры порядка 1000 К [5]. Среди указанных способов инициирования в первых двух нагрев осуществляется за счет поглощения лазерного излучения.

Описание эксперимента и схема установки. В данной работе проводились опыты по проверке лучевой стойкости и генерации лазерной искры при помощи волоконного лазера с длиной волны 1,125 мкм (1125 нм) в волокнах типа:

1. Одномодовое волокно Corning SMF-28 с диаметром сердцевины 10 мкм, со ступенчатым профилем показателя преломления;
2. Многомодовое волокно с градиентным профилем показателя преломления Corning 62.5/125;
3. Многомодовое волокно с градиентным профилем показателя преломления OFS 100/140 BF04432-01;
4. Одномодовое волокно PM lowOH с диаметром сердцевины 8 мкм, со ступенчатым профилем показателя преломления.
5. Многомодовое волокно Nufern MM-S105/125-22A со ступенчатым профилем показателя преломления.

Образцы 1–3 имеют сердцевину, легированную германием, образцы 4–5 имеют нелегированную сердцевину волноводные свойства,

в которой обеспечиваются фторированием оболочки. Волокна с фторированной оболочкой могут выдерживать на порядок большие мощности.

Для опытов был изготовлен макет иттербиевого волоконного лазера с длиной волны 1125 нм, схема которого изображена на рис. 1.

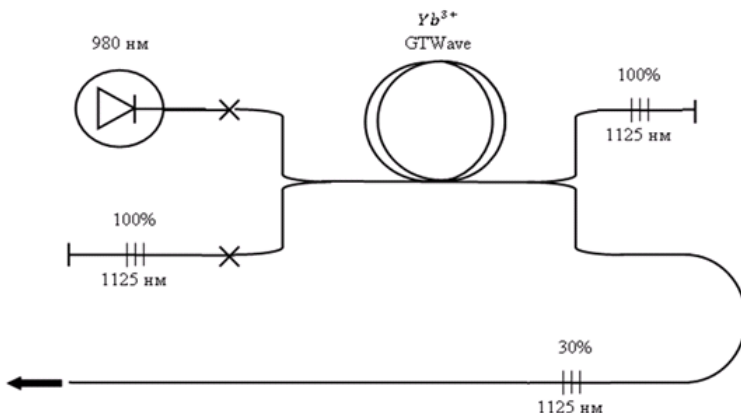


Рис. 1. Схема экспериментального иттербиевого волоконного лазера с длиной волны 1125 нм

В качестве активной среды использовалось волокно с многокомпонентной оболочкой GTWave, легированное ионами иттербия, длина активного контура составила 34 м. Накачка лазера производилась лазерным диодом с мощностью 29,5 Вт и центральной длиной волны 976 нм через пассивную жилу волокна GTWave. К концам активной жилы были приварены брегговские решетки с резонансной длиной волны $\lambda_{BG} = 1125$ нм, коэффициент отражения решеток R составлял 100 и 30 %. Волоконный лазер работает в непрерывном режиме, спектральная ширина лазера составила 0,2 нм. Мощность лазера варьировалась в диапазоне 0,08–7,29 Вт, а его дифференциальная эффективность составила 31 %.

Методика проведения эксперимента. Исследование проводилось на собранном макете лазера посредством генерации излучения лазером и инициализации детонационного разрушения (искры) посредством контакта металлического предмета (стриппера) с очищенным концом волокна. Схема инициации детонационного разрушения волокна представлена на рис. 2.

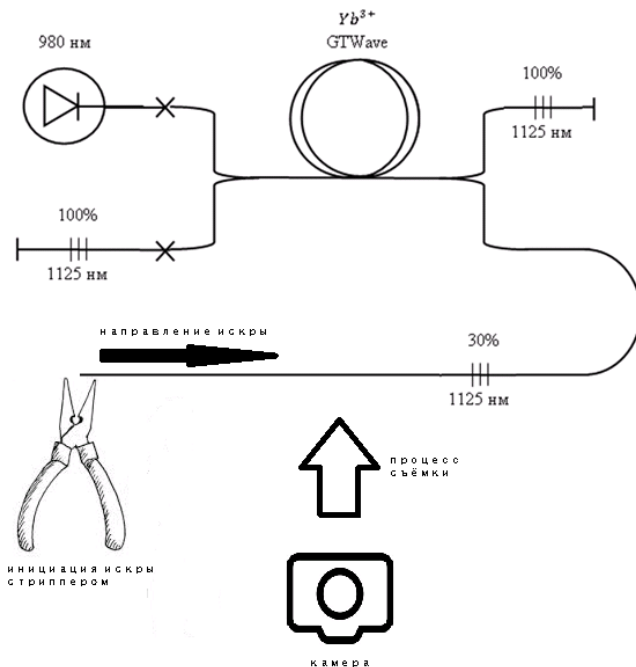


Рис. 2. Схема эксперимента по генерации лазерной искры

Далее наблюдалось движение искры в сторону лазерного диода, что фиксировалось на высокочастотную камеру. Также испытывались другие методы инициации искры – нагрев и обрыв, в обоих случаях присутствовал эффект оптического пробоя.

Результаты эксперимента. Из результатов эксперимента видно, что наименьшей оптической стойкостью обладают образцы 1–3, это связано с тем, что в этих образцах световедущие свойства сердцевинки обусловлены примесью германия, а такой состав стекла приводит к образованию нелинейных центров поглощения в волокне. В образцах 1–2 возникала лазерная искра и начинался процесс катастрофического разрушения волокна, разрушение сопровождалось выгоранием сердцевинки волокна со скоростью больше 1 м/с. Процесс катастрофического разрушения волокна неизменно приведет к разрушению как волокна доставки, так и к разрушению контура самого лазера или усилителя.

Для определения пороговой мощности, при которой происходит оптический пробой среды, производилось варьирование мощности

лазера, ее измерение, а затем загрязнение торца опытного волокна. Значение мощности, при котором производился разряд, фиксировалось. Плотность мощности определялась как отношение выходящей мощности к площади сердцевины волокна:

$$Pd = \frac{P_{\text{пор}}}{S_{\text{core}}}, \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}.$$

Таблица 2

Пороги образования оптического пробоя в волокне

№ обр.	D _{core} , мкм	Pd, Вт/см ²	P _{пор} , Вт
1	10	1528662	1.2
2	62.5	78268	2.4
3	105	57773	5 *
4	6	34677990	9.8
5	100	>	>

Видео процесса распространения лазерной искры по оптическому волокну доступно по ссылке <https://photos.app.goo.gl/HTFvGjbwsdCp0qJ23>

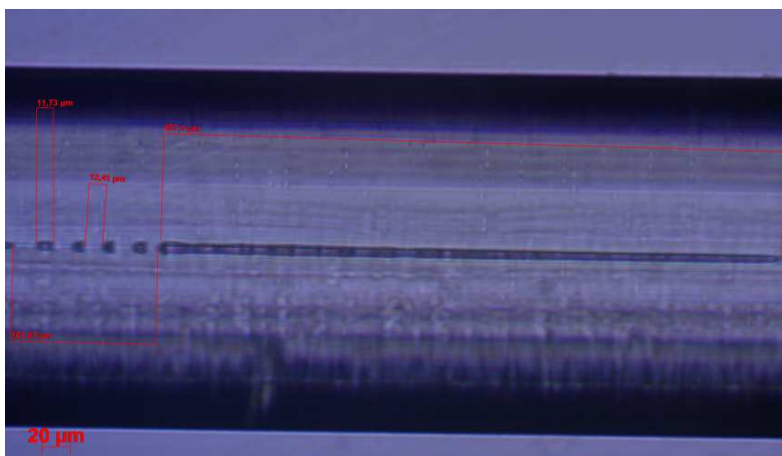
Процесс образования искры в образце 3 начинался от 5 Вт, но характер распространения был совершенно иной. Скорость распространения искры составляла около 1 см/с, волокно в точке образования искры уничтожалось полностью, т.е. взрывалось, расстояние, на которое распространялась искра, составляло до 5 см, потом процесс затухал.

Образец 4 поддерживал режим детонационного разрушения только после достижения выходной мощности 9,8 Вт, соответственно пороговая плотность мощности составляла 34,7 МВт/см².

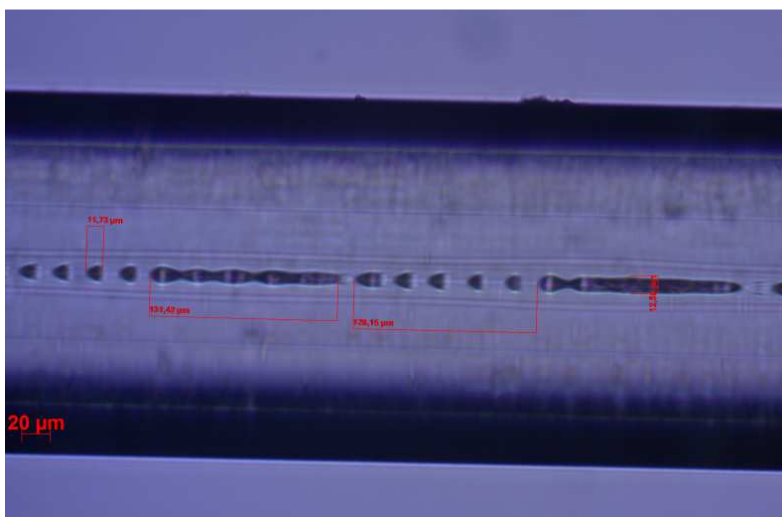
В образце 5 не удалось реализовать создание оптической искры, но торец волокна подвергался оплавлению в ходе загрязнения.

Выгоревшая сердцевина волокна не может далее распространять свет за счет образования периодических дефектов в виде пузырьков, пустот-эллипсоидов, и пустот микрокапилляров. Пример разрушения образца №2 представлен на рис. 3.

Для предотвращения возникновения эффекта разрушения оптоволоконной линии связи необходимо придерживаться регламентных работ по поддержанию оптической сети, а именно очищать коннекторы перед установкой в оптические разъёмы, использовать герметичные оптические коннекторы и периодически очищать коннекторы от пыли.



a



б

Рис. 3. Микроскопическое изображение с увеличением 20X волокна №2 поврежденное при мощности: *a* – 4,5 Вт; *б* – 5,6 Вт

Следует внедрять в оптическую линию оптические предохранители, такие как тейпера, фотонно-кристаллические волокна, волокна с расширенной сердцевинной и волокна «чистый кварц» с сердцевинной, не имеющей легирующей присадки [6].

Библиографический список

1. Wood R.M. Laser induced damage thresholds and laser safety levels. Do the units of measurement matter? // Opt. Laser Tech. – 1997. – 29(8). – P. 517–522.
2. Буфетов И.А., Дианов Е.М. Оптический разряд в волоконных световодах // УФН. – 2005. – 175:1, 100–103; Phys. Usp. – 2005. – 48:1. – P. 91–94.
3. Kashyap R. Self-propelled self-focusing damage in optical fibers // Proc. Xth Inter. Conf. on Lasers, 7–11 Dec. 1987. – P. 859–866. – Lake Tahoe, Nevada, USA; Kashyap R., Blow K.J. Self-propelled self-focusing damage in optical fibers // Electronics, Lett. – 1988. – 24(1). – P 47–49.
4. Liquid Hydrostatic Pressure Optical Sensor Based on Micro-Cavity Produced by the Catastrophic Fuse Effect / Maria de Fátima F.Domingues, Tiago de Brito Paixão, Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita, Nélia Alberto, Ana Rita Frias, Rute A. S. Ferreira, Humberto Varum, Paulo Fernando da Costa Antunes / IEEE Sensors Journal. – Oct. 2015. – Vol. 15, iss. 10. – P. 5654–5658.
5. Hand D.P., Russell P.S.J. Solitary thermal shock waves and optical damage in optical fibers: the fiber fuse // Opt. Lett. – 1988. – 13(9). – P. 767–769.
6. Shin-ichi Todoroki. Fiber Fuse. Light-Induced Continuous Break-down of Silica Glass Optical Fiber. – Berlin: Springer, 2014. – P. 9–12.

Сведения об авторах

Щербакова Виктория Александровна – студентка Пермского государственного национального исследовательского университета, гр. РФЗ-1-2014-НБ, г. Пермь, e-mail: scherbackova.vict@mail.ru.

Гаранин Андрей Иванович – аспирант кафедры «Прикладная математика» Пермского государственного национального исследовательского университета, г. Пермь, e-mail: kigaranin@ya.ru.

Конин Юрий Александрович – аспирант кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, факультет прикладной математики и механики, г. Пермь, e-mail: yuri-konin@ya.ru.

Т.В. Белаш, В.И. Фрейман

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ИНФОКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ, ИСПОЛЬЗУЮЩЕЙ АРИФМЕТИЧЕСКОЕ КОДИРОВАНИЕ

В данной статье рассмотрены исследование свойств и анализ модели арифметических кодов в инфокоммуникационных системах. Приведена модель обнаружения арифметических ошибок избыточными кодами в СОК.

Ключевые слова: арифметические коды, инфокоммуникационные системы, система остаточных классов, избыточные коды, MatLab Simulink, обнаружение арифметических ошибок.

T.V. Belash, V.I. Freyman

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF MODELS OF INFOCOMMUNICATION SYSTEMS USING ARITHMETIC CODING

In this paper, we study the properties and analysis of models of arithmetic codes in infocommunication systems. The model of detection of arithmetic error redundant codes in the SRC.

Keywords: Arithmetic codes, infocommunication systems, residue number system, redundancy codes, MatLab Simulink, the detection of arithmetic errors.

Актуальностью исследования является тот факт, что арифметические коды обнаруживают и исправляют ошибки, возникающие вследствие действия шума при хранении, передаче и обработке информации по сетям связи. Основной проблемой здесь является экономное использование избыточности для достижения требуемой помехоустойчивости передачи данных по каналу с шумом или при их хранении на некотором носителе. Знание раздела теории кодирования необходимо для разработчиков как аппаратного, так и программного обеспечения современных информационных систем.

Объект исследования – алгоритмы обнаружения и исправления арифметических ошибок.

Предмет исследования – арифметические коды, методика реализации помехоустойчивого кодирования.

Цель исследования – рассмотреть арифметические коды для организации обнаружения и исправления ошибок передачи данных.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- выбор среды моделирования;
- с помощью компьютерной модели в среде MatLab Simulink построить модель обнаружения арифметических ошибок избыточными кодами в СОК.

На рис. 1 представлена модель обнаружения арифметических ошибок избыточными кодами в СОК, значения взяты для примера № 1.

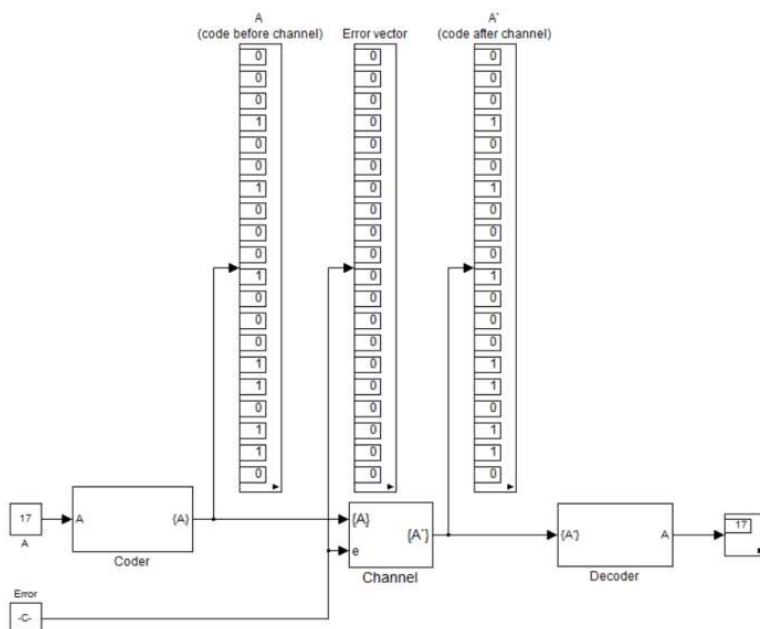


Рис. 1. Модель обнаружения арифметических ошибок избыточными кодами в СОК

Пример 1.

Пусть $A = 17$ и $p_1 = 2$; $p_2 = 3$; $p_3 = 5$; $p_4 = 7$; $p_5 = 11$. Тогда $\{A\} = (1, 2, 2, 3, 6)$.

На рис. 2 представлен кодер модели обнаружения арифметических ошибок. В кодере число $A = 17$ берется по основаниям $p_1 = 2$; $p_2 = 3$; $p_3 = 5$; $p_4 = 7$; $p_5 = 11$. Тогда $\{A\} = (1, 2, 2, 3, 6)$, преобразовываем в двоичные числа и отправляем в канал передачи.

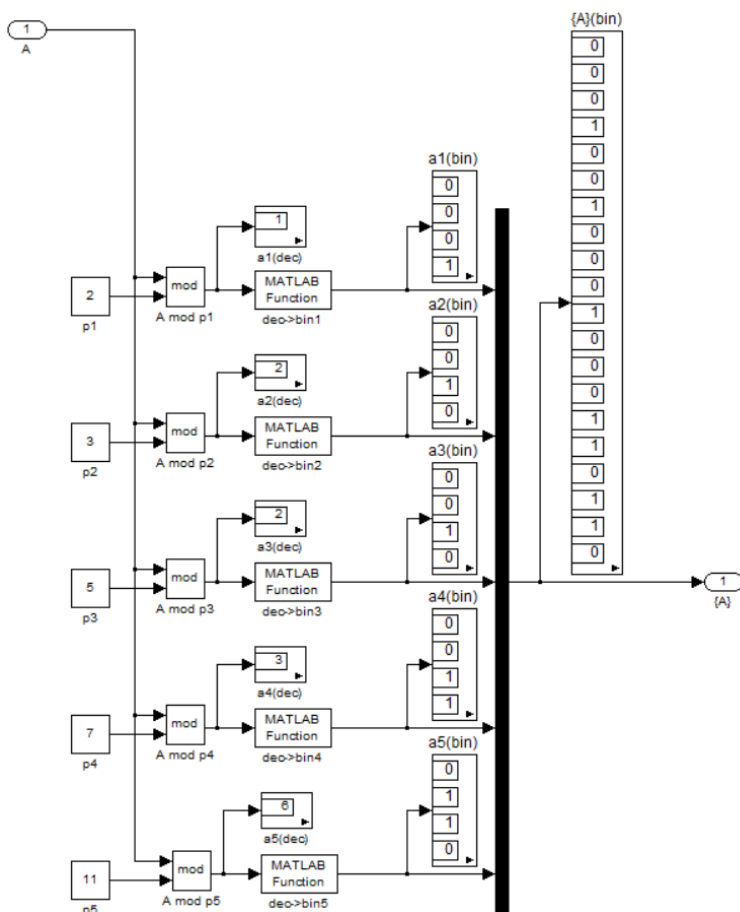


Рис. 2. Кодер, модели обнаружения арифметических ошибок

Канал передачи представлен на рис. 3.

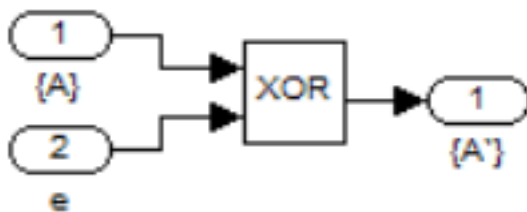


Рис. 3. Канал передачи

Он построен так, что закодированное число можем суммировать с вектором ошибки. Это сделано для того, чтобы можно было исследовать нашу модель на корректирующие способности.

После канала передачи закодированное число попадает в декодер, который представлен на рис. 4.

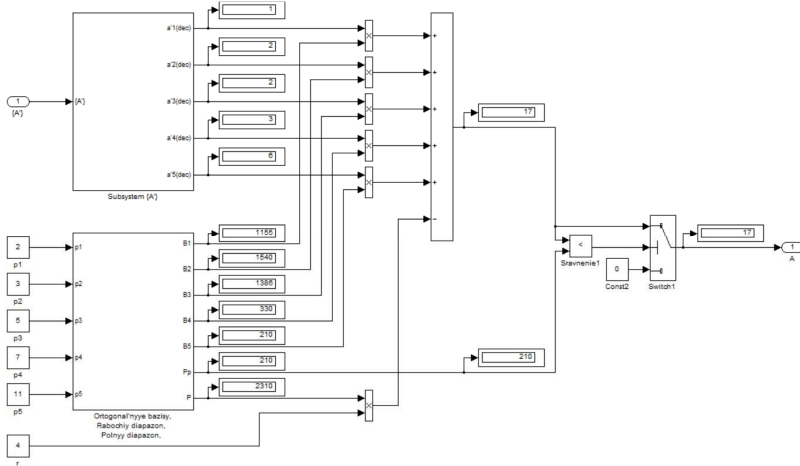


Рис. 4. Декодер модели обнаружения арифметических ошибок

На рис. 5 представлен блок, в котором рассчитываются: ортогональные базисы, рабочий диапазон и полный диапазон. Полный диапазон $P = p1 \cdot p2 \cdot p3 \cdot p4 \cdot p5 = 2 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 7 \cdot 11 = 2310$, а рабочий диапазон $P_p = 210$. Определим ортогональные базисы системы по формуле:

$$B_i = \frac{m_i \cdot P}{p_i}, \quad \forall i \in \overline{1, n}, \quad (1)$$

$$B_1 = (1, 0, 0, 0, 0) = 1155; \quad B_2 = (0, 1, 0, 0, 0) = 1540; \quad B_3 = (0, 0, 1, 0, 0) = 1386;$$

$$B_4 = (0, 0, 0, 1, 0) = 330; \quad B_5 = (0, 0, 0, 0, 1) = 210.$$

Пусть передано число $\{A\} = (1, 2, 2, 3, 6) = 17$. В канале передачи суммируем наше число с вектором ошибки. На рис. 6 мы видим, что в декодер вместо переданного числа $\{A\} = (1, 2, 2, 3, 6) = 17$ принято число $\{A'\} = (1, 2, 2, 5, 6)$.

Для обнаружения ошибки вычислим десятичное представление числа A и сравним его с рабочим диапазоном:

$$\begin{aligned} A' &= 1 \cdot 1155 + 2 \cdot 1540 + 2 \cdot 1386 + 5 \cdot 330 + 6 \cdot 210 - r \cdot 2310 = \\ &= 9917 - 9240 = 677 > 210. \end{aligned}$$

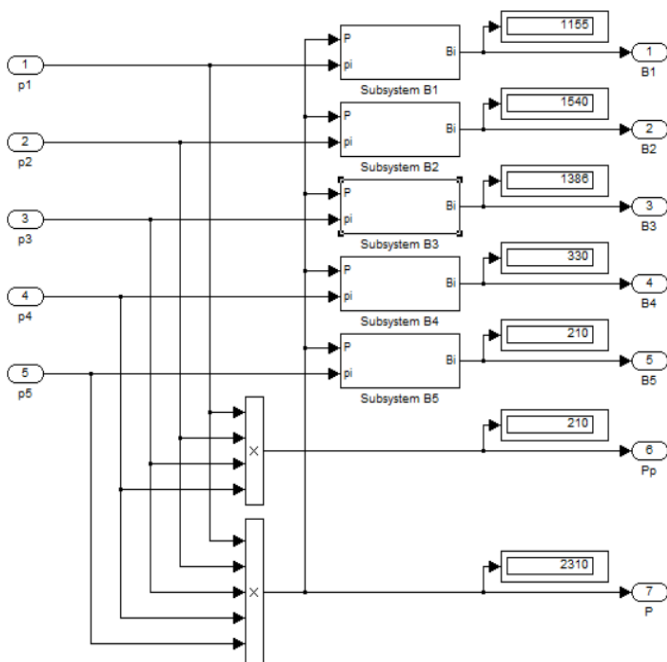


Рис. 5. Блок расчета ортогональных базисов, рабочего диапазона и полного диапазона

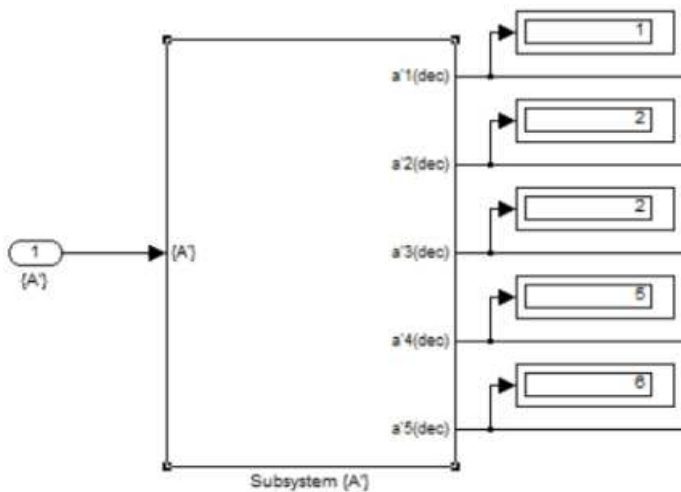


Рис. 6. Декодер, на входе искаженное число $\{A'\}=(1,2,2,5,6)$

Эти действия представлены на рис. 7.

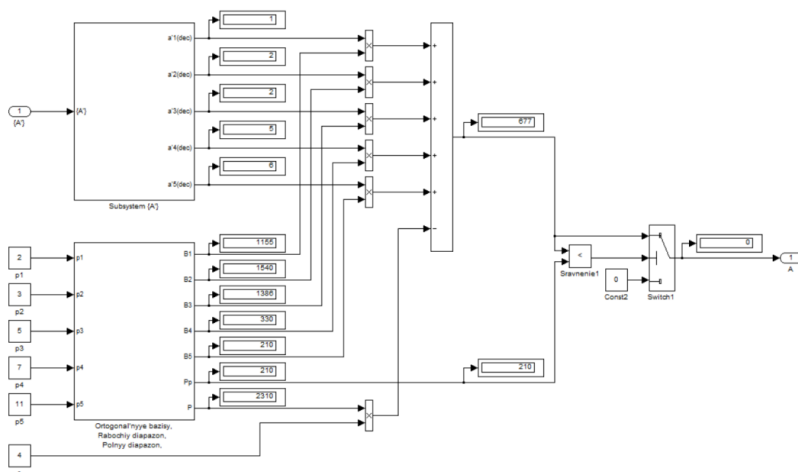


Рис. 7. Декодер с принятым искаженным числом на входе

Так как A' больше 210, оно является неправильным, т.е. ошибка обнаружена. Данный пример иллюстрирует следующий алгоритм обнаружения ошибок:

1. Зафиксировать конец цепи модульных операций.

2. Произвести перевод числа из избыточного кода в СОК в число, представленное в десятичной позиционной системе счисления по модулю полного диапазона чисел P . Данный пункт можно разбить на более мелкие пункты алгоритма, содержание которых обусловлено способом преобразования $A' \rightarrow A'_{10}$ («'» означает, что соответствующее число может быть искажено).

3. Проверить попадание $A'_{10} \pmod{P}$ в рабочий диапазон (P_p). Если $A'_{10} < P_p$, то результат получен без искажений, иначе – результат вычислен с ошибкой. Если результат вычислен с ошибкой – происходит стирание.

Библиографический список

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. ун-та, 2007. – 312 с.

2. Вернер, М. Основы кодирования: учебник для вузов. – М.: Техносфера, 2014. – 288 с.

3. Акушский И.Я., Юдицкий Д.И. Машинная арифметика в остаточных классах. – М.: Советское радио, 1968.

4. Белаш Т.В., Фрейман В.И. Исследование свойств и возможностей применения арифметических кодов в инфокоммуникационных системах // Автоматизированные системы управления и информационные технологии: материалы всерос. науч.-техн. конф. (23 мая 2017 г. Пермь). – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2017. – Т. 2. – С. 268–273. – URL: etf.pstu.ru/conf/fac_conf.html

Сведения об авторах

Белаш Тимофей Владимирович – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ТК4-16-1м, г. Пермь, e-mail: Tima-belash94@rambler.ru.

Фрейман Владимир Исаакович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: vfrey@mail.ru.

С.С. Ермилов, С.А. Тюрин

ТЕХНОЛОГИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЯХ

В данной статье рассмотрены методы определения местоположения с помощью сигналов и данных мобильной связи, не используя спутниковую связь и Wi-fi точки доступа, т.е. так называемые альтернативные способы определения местоположения объекта.

Ключевые слова: базовая станция, сотовая связь, затухание сигнала, местоположение.

S.S. Ermilov, S.A. Tyurin

TECHNOLOGIES FOR DETERMINING THE LOCATION OF MOBILE OBJECTS IN WIRELESS NETWORKS

This article describes the methods of determining the location using signals and mobile data, do not use satellite communication and Wi-Fi access points, that is, the so-called alternative methods of determining the location of the object.

Keywords: base station, mobile communication, signal attenuation, location.

Технологии определения местоположения мобильных объектов в беспроводных сетях. За последние десятилетия беспроводная связь вошла в повседневную жизнь практически каждого человека. Мир стал более мобильным, и непрерывный доступ к информации стал считаться основным требованием. По такой причине службы беспроводной связи получили широкое распространение, и информация о местоположении стала полезной информацией в мире беспроводной связи.

В результате инфраструктура, которая обеспечивала связь между беспроводными устройствами, стала активно разрастаться в сторону большего охвата, большей гибкости и более высокой интероперабельности. Помимо этого с учетом быстрого развертывания беспроводных сетей информация о местоположении стала представлять большой интерес, особенно в определенных обстоятельствах, таких как спасательные, чрезвычайные ситуации и навигация.

Несмотря на большое количество различных систем позиционирования и решений для беспроводных сетей, типов измерений, которые используются для определения позиций пользователя, не так много. Измерения могут быть зависимыми от базовой станции

идентификационными метками и/или взаимозависимыми, таких как RSS*. Рассмотрим типы измерений и методы их оценки.

Cell ID (Индификатор ячейки). Идентификация ячейки/клетки (либо CID) рассматривается как метод локализации, который помогает установить местоположение мобильной станции в качестве положения фиксированных опорных точек (FRP), к которым подключены мобильные станции. В практической деятельности «идентификатор ячейки» определяется в базе данных с целью установления положения и диапазона точности FRP. Такая технология ограничена физическим диапазоном связи FRP. Для поддержки однозначного позиционирования FRP должны быть однозначно идентифицированы во всей сети. К примеру, в сетях WLAN либо Bluetooth MAC-адрес используется таким идентификатором. Как правило, идентификатор ячейки (рисунок) применяется в сочетании с иными типами информации, к примеру, измерение диапазона и/либо угла, информации о карте покрытия либо картографические данные (Gustafsson and Gunnarsson, 2005b). Одна из основных проблем с такими данными состоит в том, что позиции FRP обычно выступают как конфиденциальные сетевые операторы.

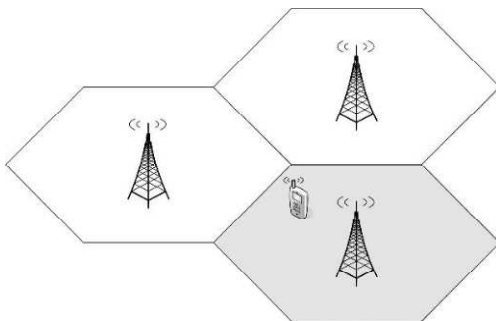


Рис. 1. Индификатор ячейки

Received Signal strength (уровень принимаемого сигнала). RSS представляет собой показатель мощности сигнала, который приемник определяет на собственных терминалах. С использованием эффектов разрушающего распространения такая мера обычно подвержена шумам с вариациями для десятков дБ для типичных сценариев, представляющих интерес, т.е. формируются локальная локализация и наружная дальняя локализация.

* Figueiras J. Mobile Positioning and Tracking. From Conventional to Cooperative. – United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd, 2013. – P. 65.

RSS может включать как постоянный, так и переменный компонент. Обычно постоянная составляющая задается моделью распространения потерь, переменная составляющая задается совокупностью комплексных эффектов распространения. В качестве подобных эффектов распространения могут выступать, к примеру, затухание сигнала, затенение, эффекты многолучевости, рассеяние и дифракция^{**}.

Что касается переменной компоненты, трудно построить модель, которая принимает стохастическое поведение задействованных эффектов распространения. Причина в том, что такие эффекты существенно зависят от сценария.

Time of arrival (Время) TOA – это метка времени, которую получатель видит на своих внутренних часах в момент принятия сигнала на собственном терминале. Наибольшее воздействие на формирование ошибки при наблюдении TOA оказывает гранулярность внутренних часов.

Time difference of arrival (Разница времени). TDOA – это разница между двумя измерениями TOA, полученными от двух эквивалентных сигналов, излучаемых точно в одно и то же время. Этот метод предполагает два возможных режима: восходящую и нисходящую линии связи. В восходящей линии связи мобильная станция подает сигнал, который принимается на двух разных базовых станциях. Этот режим предполагает возникновение проблем с масштабируемостью, поскольку все операции выполняются в сети. Напротив, в режиме нисходящей линии две базовые станции передают одновременно два эквивалентных сигнала, которые принимаются мобильной станцией. Этот режим более масштабируемый, чем восходящий, поскольку расчеты выполняются на мобильной станции. Независимо от режима работы базовая станция должна быть синхронизирована с часами, при этом базовая и мобильная станции не должны быть взаимно синхронизированы.

Сведения об авторах

Ермилов Сергей Сергеевич – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ТК4-16-1м, г. Пермь, e-mail: Ser-ermilo@yandex.ru.

Тюрин Сергей Александрович – старший преподаватель кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: tiurinsa@yandex.ru.

^{**} Figueiras J. Mobile Positioning and Tracking. From Conventional to Cooperative. – United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd, 2013. – P. 68.

Л.А. Клейман, В.И. Фрейман

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ И МОНИТОРИНГА ТОЧЕК WI-FI ДОСТУПА

Для непрерывности рабочих процессов организаций и государственных учреждений необходим качественный доступ к локальным и внешним электронным ресурсам. Для обеспечения такого доступа необходима удобная и функциональная система мониторинга сети, предоставляющая администраторам все возможности для быстрого реагирования на инциденты. В статье описываются логика системы, функционал и средства реализации.

Ключевые слова: система управления, точка доступа, Wi-Fi, сеть, организация, клиент, пользователь.

L.A. Kleiman, V.I. Freyman

CONTROL AND MONITORING SYSTEM OF WI-FI ACCESS POINTS

Qualitative access to local and external electronic resources is required for the continuity of the working processes in organizations and public institutions. To provide such access, a convenient and functional network monitoring system is needed. It provides administrators with all the facilities for rapid response to incidents. The article describes the logic of the system, the stages of construction and the means of implementation.

Keywords: control system, access point, Wi-Fi, network, organization, client, user.

Введение. В настоящее время доступ в сеть является одной из основных потребностей человека. Так, работа любого предприятия как государственного, так и частного не может обойтись без доступа в сеть. Для обеспечения непрерывности бизнес-процессов сетевое соединение должно работать без сбоев. В таком случае необходимы системы мониторинга, позволяющие быстро находить и устранять возникающие неполадки сети. В эру беспроводных технологий основным методом доступа в сеть является Wi-Fi.

Работа в этом направлении уже ведется, а целью данной статьи является описание конкретных технологий, используемых для создания некоторых подсистем, описанных в статье [1].

Задачей данной статьи является описание актуальных технологических решений, приведение примеров программной реализации, которые могут быть использованы для создания системы управления и мониторинга Wi-Fi-сети.

Также стоит отметить, что подсистема расчёта Wi-Fi покрытия многоэтажного здания может являться отдельной, самостоятельной задачей, требующей тонкой работы. Описание ее реализации будет дано в следующих работах.

Описание подсистем. Взаимодействие системы с пользователем показано на рис. 1.



Рис. 1. Блок-схема взаимодействия пользователя и подсистем

1. *Подсистема авторизации.* Когда пользователь начинает пользоваться системой, в первую очередь его встречает подсистема авторизации. В рамках решаемой задачи есть два пути, которые выбираются, исходя из набора требований к самой системе. Первый, наиболее быстрый и простой в реализации, – это готовое API. На рынке существует множество решений, таких как Deployd, Firehose, Socket.io, Atmosphere, Hoodie и другие. Но в данной ситуации нужно было такое, которое поддерживало бы простую интеграцию с фреймворком Angular 2/4.

После рассмотрения существующих решений выбор был сделан в пользу решения Google Firebase для веб-приложений. Для его использования необходимо создать приложение в личном кабинете Google Firebase. После этого выдается уникальный ключ, который вписывается в веб-приложение. Далее нужно только сверстать форму входа и написать простой сервис авторизации (рис. 2).

Firebase поддерживает несколько способов авторизации:

- адрес электронной почты и пароль;
- телефон;
- Google аккаунт;
- анонимный вход.

```

export const firebaseconfig = {
  apiKey: "AIza[REDACTED]",
  authDomain: "[REDACTED].firebaseapp.com",
  databaseURL: "https://[REDACTED].firebaseio.com",
  projectId: "[REDACTED]",
  storageBucket: "[REDACTED].appspot.com",
  messagingSenderId: "684[REDACTED]"
};

login(email: string, password: string) {
  this.firebaseAuth
    .auth
    .signInWithEmailAndPassword(email, password)
    .then( onfulfilled: value => {
      console.log(this.user);
      window.location.href='';
    })
    .catch( onrejected: err => {
      this.error = err.message;
    });
}

logout() {
  this.firebaseAuth
    .auth
    .signOut().then( onfulfilled: value=>{
      window.location.href='login';
    });
}

```

Рис. 2. Сервис авторизации

Также процесс авторизации происходит по защищенному соединению, следовательно, данные не могут быть перехвачены злоумышленниками. Данная технология использует JWT-токены [2], что оказывается достаточно полезно и безопасно. Второй путь немного сложнее. Он заключается в использовании локальной базы данных и бэкэнд фреймворка, например Django (Python) или Laravel (PHP). Преимуществом данного решения является место хранения данных. Все данные хранятся на локальной БД и не уходят во вне. С другой стороны, появляется необходимость администрировать БД, а также вручную создавать механизмы и способы авторизации.

2. *Подсистема информации и статистики.* Как было описано ранее, необходимо связать создать быстрый переход между тройкой «клиент–точка доступа–событие». Также информация должна быть актуальной. Для получения информации с Wi-Fi контроллера используется протокол SNMP, BackEnd-скрипты на языке программирования PHP и AJAX-запросы с клиентской стороны, написанной на языке JavaScript при помощи фреймворка Angular 2. Также используется самый распространенный и полный MIB контроллеров – MIB AIRESPACE-WIRELESS-MIB [3]. В нем содержатся ссылки, по кото-

Последовательность действий при работе с системой следующая: администратор сети (пользователь системы) заходит в приложение. Перед ним открывается интерфейс, в котором он может выбрать то, за чем он сейчас хочет наблюдать: Клиенты, Точки доступа, Логи контроллера (логи всех точек доступа и клиентов). Все данные представлены в виде таблиц (рис. 3) с возможностью настройки отображаемых столбцов, числа записей на странице. Существуют возможность поиска по столбцам, пагинатор и возможность перехода к подробной информации.



3. *Подсистема оповещения о событиях.* События могут быть самыми различными – от подключения клиента и до определения DDOS-атаки на точку доступа. На разные события нужно реагировать по-разному и, самое главное, с разной скоростью. В разрабатываемой системе снова можно пойти двумя путями. Уже знакомый нам Google Firebase позволяет использовать систему оповещений. Вам выдаются

ключ и адрес, с помощью которых нужно отправлять сообщения в сервис. И данный сервис способен отправлять данные сообщения все подписанным на него пользователям системы. Так как большинство событий, на которые нужно немедленное реагирование, приходят от контроллера по технологии SNMP TRAP, которые контроллер способен рассылать на указанные ему адреса, то системе необходим сервис, который будет реагировать на поступление сообщений, постоянно «слушающая» сокет. Такой сервис может быть реализован на языке PHP. Его функционал – простой. Слушать и отправлять по «вшитому» в конфигурационный файл адресу с помощью выданного ключа.

Второй путь подразумевает ручное создание сервиса рассылки клиентам информации. Должна быть возможность рассылки СМС и e-mail уведомлений.

Заключение. Описанные подсистемы очень важны для поддержания безопасности сети организации или предприятия, поэтому их реализация должна быть максимально простой, удобной и понятной. В таких случаях лучше воспользоваться готовыми бесплатными решениями, способными выполнить всю возложенную на них миссию.

Библиографический список

1. Клейман Л.А., Фрейман В.И. система управления точками Wi-Fi-доступа // Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике. – 2017. – № 1. – С. 39–45.
2. JSON Web Token (JWT): IETF, США, 2015 / M. Jones J. Bradley, N. Sakimura.
3. Cisco virtual wireless controller data sheet // Cisco, 2017. – URL: https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/virtual-wireless-controller/data_sheet_c78-714543.html (дата обращения: 15.12.2017).

Сведения об авторах

Клейман Лев Александрович – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: smarttty@yandex.ru.

Фрейман Владимир Исаакович – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: vfrey@mail.ru.

Ю.В. Лихачева

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПРОТОКОЛА МАРШРУТИЗАЦИИ

В данной статье выводятся основные критерии оценки эффективности протоколов маршрутизации для беспроводных сенсорных сетей, описываются результаты сравнительного анализа числовых параметров энергопотребления сетей при использовании протоколов маршрутизации LEACH и PEGASIS на основе их имитационных моделей.

Ключевые слова: беспроводные сенсорные сети, протокол маршрутизации, LEACH, PEGASIS, оценка энергоэффективности.

Yu.V. Likhacheva

WSN ENERGY CONSUMPTION EFFICIENCY RESEARCH DEPENDING ON THE ROUTING PROTOCOL

This article shows the basic criteria for assessing the effectiveness of routing protocols for wireless sensor networks, describes the results of a comparative analysis of the numerical parameters of power consumption of networks using the LEACH and PEGASIS routing protocols based on their simulation models.

Keywords: wireless sensor network, routing protocols, LEACH, PEGASIS, energy efficiency evaluation.

Технология миниатюрных интеллектуальных сетей датчиков нашла применение в следующих областях: мониторинг телекоммуникационной инфраструктуры сетей, мониторинг транспортных магистралей (железных дорог, метрополитена и др.), нефте- и газопроводов, инженерных сетей энерго- и теплоснабжения, контроль и анализ транспортных грузопотоков, экологический, биологический и медицинский мониторинг, автоматизация систем жизнеобеспечения и системах класса «Умный дом», выявление и предупреждение чрезвычайных ситуаций и др. [2].

Сенсоры в таких сетях являются автономными устройствами, которые обладают низкопроизводительным процессором, небольшим объемом памяти и маломощным передатчиком. К протоколам маршрутизации выдвигаются следующие требования: низкое время

реакция при изменении маршрутов; регулирование скорости передачи и обработки данных; высокая энергоэффективность (низкое энергопотребление узлами сети); высокопроизводительный сбор и агрегация данных; обеспечение заданного уровня качества обслуживания; обеспечение безопасности передачи данных; максимизирование зоны покрытия сети.

Выбор эффективного протокола маршрутизации для данного сценария работы сети может снизить энергопотребление как всей системы, так и отдельных узлов, что очень важно при использовании автономных источников питания; снизить задержки на передачу и обработку данных, что является необходимым условием в системах, чувствительных к задержкам, как, например, выявление чрезвычайных ситуаций, сети датчиков на опасном производстве [3].

Была составлена таблица критериев для оценки эффективности протоколов маршрутизации (табл. 1). Далее при составлении сценариев работы сети будем присваивать приоритет тому или иному критерию, в зависимости от их важности в данном сценарии.

Таблица 1

Критерии оценки эффективности протоколов маршрутизации в БСС

Критерии	Измеряемые параметры для оценки
Энергоэффективность	1. Энергопотребление всей сети 2. Энергопотребление одного узла 3. Число раундов до «смерти» всех узлов 4. Число раундов до «смерти» первого узла
Задержки	1. Средняя задержка доставки пакета 2. Время для завершения определенного числа раундов 3. Средняя задержка на передачу пакета за раунд 4. Средняя задержка на агрегацию данных за раунд
Надежность	1. Число ошибочных передач за определенное число раундов 2. Доля ошибочных передач за определенное число раундов
Масштабируемость	1. Закон изменения энергопотребления и задержек при увеличении числа узлов в сети (для оценки целесообразности масштабирования сети)

В ходе работы был проведен анализ существующих протоколов маршрутизации в БСС и выбраны два наиболее перспективных протокола – LEACH и PEGASIS. Была составлена таблица параметров сети и протоколов, которые будут задаваться как входные данные для моделирования и будут зависеть от выбранного сценария работы сети (табл. 2).

Таблица 2

Входные параметры для моделирования

Входные данные для сети	Число узлов в сети
	Размер площадки, на которой расположены узлы
	Координаты базовой станции
	Начальная энергия одного узла/всей сети
	Размер передаваемого пакета
Входные данные для протокола LEACH	Число/доля глав кластеров
Входные данные для протокола PEGASIS	Число раундов с сохранением цепочки

Для анализа характеристик протоколов LEACH и PEGASIS были разработаны имитационные модели с использованием системы MatLab. Для моделирования в данной статье выбран сценарий распределенной на небольшой области сети датчиков мониторинга сейсмической активности внутри здания. Основным критерием для оценки было минимальное энергопотребление всей сети при максимальном числе раундов (рис. 1).

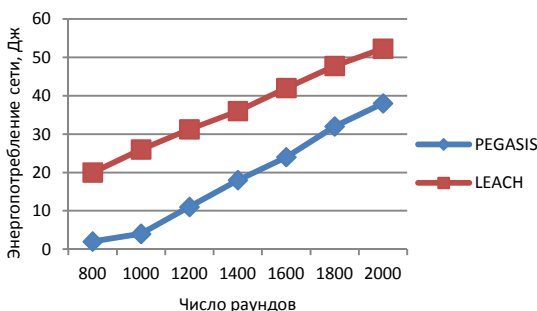


Рис. 1. Энергопотребление сети в зависимости от числа раундов

Исходные данные для моделирования: 100 узлов, случайно распределенных в области 100×100 м. Базовая станция находится в точке $x = 100$, $y = 100$. Длина каждого сигнала составляет 4000 бит, а начальная энергия каждого узла составляет 0,5 Дж. Для измерения потерь энергии из-за беспроводной передачи учитывается затухание вследствие многолучевого распространения в канале [4]. Узел считается «мертвым», когда его энергия становится нулевой, при этом узел исключается из последующих раундов (рис. 2).

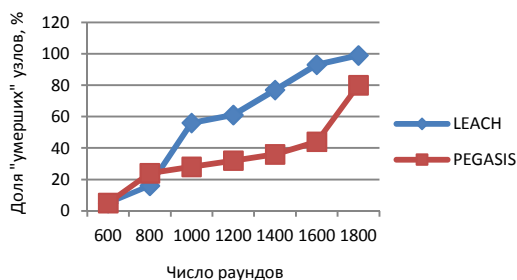


Рис. 2. Доля «умерших» узлов в зависимости от числа раундов

По результатам исследования был сделан вывод, что протокол PEGASIS в данных условиях эффективнее протокола LEACH с точки зрения объема потребленной энергии и срока службы системы. Это достигается за счет сокращения количества сообщений до удаленной базовой станции до одного за раунд.

В дальнейшем планируется реализовать другие сценарии работы сети с различными основными критериями для оценки их эффективности. Благодаря полученным результатам появляется возможность разработки нового иерархического протокола маршрутизации, который компенсирует недостатки как LEACH, так и PEGASIS.

Библиографический список

1. Routing Protocol in Wireless Sensor Networks / L.J.G. Villalba, A.L.S. Orozco, A.T. Cabrera, C.J.B. Abbas // *Sensors*. – 2009. – Vol. 9. – P. 8399–8421.
2. Heinzelman W.B., Chandrakasan A., Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks // *IEEE Trans. Wireless Communication*. – 2002. – № 4. – С. 660–670.
3. Зеленин А.Н., Власова В.А. Анализ энергоциклов узлов беспроводных сенсорных сетей // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий* – 2012. – № 3. – С. 13–17.
4. Heinzelman W.R., Chandrakasa A., Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocols for wireless microsensor networks // *33rd Hawaii International Conference on System Sciences*. – 2000. – № 2.

Сведения об авторе

Лихачева Юлия Витальевна – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ТКЗ-16-1м, г. Пермь, email: lijulia28@gmail.com.

С.П. Шипицин, М.В. Кавалеров

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ В СЕТЕВОМ СИМУЛЯТОРЕ NS-3

В данной статье приведён аналитический обзор моделей распространения радиоволн для моделирования условий городской среды, реализованных в сетевом симуляторе ns-3, показаны их особенности.

Ключевые слова: беспроводная сеть, симулятор, моделирование, ns-3.

S.P. Shipitsin, M.V. Kavalero

FEATURES OF URBAN ENVIRONMENT SIMULATING IN NETWORK SIMULATOR NS-3

In this article presents an analytical review of propagation models for modeling the urban environment conditions implemented in the network simulator ns-3 is presented, their features are shown.

Keywords: wireless network, simulator, simulating, ns-3.

В современном мире решающее значение имеют мобильные беспроводные сети. Исследователи постоянно ищут новые подходы, позволяющие обеспечить более высокое качество обслуживания абонентов. Однако такие исследования не могут проводиться без экспериментальных данных, а воплощать каждую новую (возможно, нежизнеспособную) идею «в железе» зачастую нецелесообразно и слишком дорого. В связи с этим был разработан ряд инструментов имитационного моделирования – сетевых симуляторов, в числе которых свободный ns-3.

Но просто промоделировать сетевые устройства недостаточно, поскольку они взаимодействуют обычно в окружении разного рода препятствий, которые влияют на распространение радиоволн. Для воссоздания условий плотной городской застройки, помещений отдельного здания или лесополосы необходимо располагать адекватными моделями распространения сигнала в такой среде.

Практически весь функционал, относящийся к моделированию условий городской среды, реализован отдельным модулем Buildings [1]. Этот модуль содержит следующие классы:

- `Building` – моделирует здания в сценарии моделирования;
- `MobilityBuildingInfo` – позволяет указать местоположение, размер и характеристики зданий, присутствующих в моделируемой области, и позволяет размещать узлы внутри этих зданий;
- `BuildingsPropagationLossModel` – класс контейнера с определением наиболее полезных моделей распространения радиоволн и соответствующих переменных;
- `HybridBuildingsPropagationLossModel` – гибридная модель, работающая только совместно с `MobilityBuildingInfo` и позволяющая моделировать распространение радиоволн как внутри, так и снаружи зданий;
- `OhBuildingsPropagationLossModel` – упрощенная модель, работающая только с моделью распространения Окумура–Хата [2].

Класс `Building` создан непосредственно для того, чтобы размещать здания в моделируемой области. Объект класса представляет собой параллелепипед и может содержать трёхмерную сетку одинаковых по размеру комнат. Такие, на первый взгляд, ограничения функциональности не позволяют построить модель здания произвольной формы, однако играют скорее положительную роль, поскольку в противном случае последовало бы несоизмеримое усложнение процесса написания модели. К сожалению, ns-3 является инструментом, написанным программистами и для программистов – никакого графического пользовательского интерфейса нет и в помине, всё реализуется с помощью моделей-скриптов и выводится после моделирования в текстовые файлы. Есть две программы визуализации: `NetAnim` и `PyViz`, но они предназначены для отображения результатов моделирования и никоим образом не автоматизируют процесс создания скрипта.

Для различных сценариев взаимодействия узлов было разработано множество моделей распространения разной сложности. Часть из них реализована в ns-3 в составе `BuildingsPropagationLossModel`.

`External Wall Loss (EWL)` определяет уровень затухания сигнала при прохождении стен из различных материалов простыми числовыми значениями:

- дерево ~ 4 дБ;
- бетон с окнами без металлизации ~ 7 дБ;
- бетон без окон ~ 15 дБ (диапазон от 10 до 20 дБ);
- кирпич ~ 12 дБ.

Подходит для моделирования соединений узлов изнутри здания наружу и наоборот.

Internal Wall Loss (IWL) использует значения затухания EWL для соединений узлов внутри зданий и вычисляется как арифметическая сумма всех стен и межэтажных перекрытий, лежащих на прямой между ними.

Height Gain Model (HG) основывается на том факте, что при прохождении сигналом межэтажных перекрытий здания затухание составляет примерно 2 дБ.

Okumura-Hata (Окумура-Хата) также представляет собой эмпирическую модель, основанную на результатах измерений, и предназначена для вычисления затухания сигнала на расстояниях более 1 км на различных типах местности – от холмистой равнины до плотно застроенного города [2].

Kun2600 подобна Okumura-Hata, но более адекватна для радиоволн в диапазоне частот 2,3–3,5 ГГц [3].

ITU 1238 и ITU 1411 – рекомендации Международного союза электросвязи для планирования внутренних и наружных радиокommunikационных систем соответственно в диапазоне частот 0,3–100 ГГц [4, 5].

Созданная на основе перечисленных выше моделей HybridBuildingsPropagationLossModel представляет наибольший интерес, так как при определённых усилиях со стороны исследователя (об этом ниже) обеспечивает достаточно точное соответствие результатов моделирования реальным просто в силу своей адаптивности. Модель рассматривает как наружные, так и внутренние взаимодействия узлов, учитывая также тип здания в соответствии с моделями EWL и IWL.

Приведённый ниже псевдокод [1] иллюстрирует алгоритм выбора конкретной модели распространения радиоволн в зависимости от внутреннего или наружного взаимодействия или расстояния между узлами. txNode – исходящий узел, rxNode – входящий узел, L – выбираемая модель.

```
if (txNode is outdoor)
  then
    if (rxNode is outdoor)
      then
        if (distance > 1 km)
          then
            if (rxNode or txNode is below the rooftop)
              then
                L = I1411
```

```

        else
            L = OH
        else
            L = I1411
        else (rxNode is indoor)
            if (distance > 1 km)
                then
                    if (rxNode or txNode is below the rooftop)
                        L = I1411 + EWL + HG
                    else
                        L = OH + EWL + HG
                    else
                        L = I1411 + EWL + HG
            else (txNode is indoor)
                if (rxNode is indoor)
                    then
                        if (same building)
                            then
                                L = I1238 + IWL
                            else
                                L = I1411 + 2*EWL
                        else (rxNode is outdoor)
                            if (distance > 1 km)
                                then
                                    if (rxNode or txNode is below the rooftop)
                                        then
                                            L = I1411 + EWL + HG
                                        else
                                            L = OH + EWL + HG
                                else
                                    L = I1411 + EWL

```

Заметим, что у этой гибридной модели есть один весьма существенный недостаток. Поскольку переключение между моделями пороговое, иногда возникают ситуации, в которых параметры соединения при таком переходе изменяются слишком резко, вплоть до разрыва самого соединения. Правильная настройка всех параметров позволяет избежать этой проблемы, но требует дополнительных (часто – существенных) действий исследователя по настройке коэффициентов.

Модель распространения OhBuildingsPropagationLossModel была создана для упрощения HybridBuildingsPropagationLossModel и включает переключение с одной модели на другую специально для ликвидации пороговых переходов. Здесь используется только Okumi-

га-Hata, поэтому модель пригодна разве что для расчёта взаимодействий сильно разнесённых в пространстве узлов.

Далеко не каждый сетевой симулятор располагает функционалом для моделирования условий городской среды в контексте взаимодействия беспроводных мобильных устройств на физическом уровне. ns-3, хоть и является достаточно сложным для освоения инструментом, имеет в своём составе целый перечень моделей распространения радиоволн, предоставляя исследователю выбор между точностью и быстротой развёртывания имитационной модели сети.

Библиографический список

1. Design documentation – Model library [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.nsnam.org/docs/models/html/buildings-design.html#-pathloss-logics> (дата обращения: 09.05.2018).
2. An empirically based path loss model for wireless channels in suburban environments / V. Erceg [et al.] // IEEE Journal on selected areas in communications. – 1999. – Т. 17. – № 7. – P. 1205–1211.
3. Kun S., Ping W., Yingze L. Path loss models for suburban scenario at 2.3 GHz, 2.6 GHz and 3.5 GHz //Antennas, Propagation and EM Theory, 2008. ISAPE 2008. 8th International Symposium on. – IEEE, 2008. – P. 438–441.
4. Recommendation ITU-R P.1238-9 (06/2017) [Электронный ресурс]. – URL: http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1238-9-201706-I!!PDF-E.pdf (дата обращения: 09.05.2018).
5. Recommendation ITU-R P.1411-9 (06/2017) [Электронный ресурс]. – URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1411-9-201706-I!!PDF-E.pdf (дата обращения: 09.05.2018).

Сведения об авторах

Шипицин Сергей Павлович – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. АТ6-16-1м, г. Пермь, e-mail: s.p.shipitsin@gmail.com.

Кавалеров Максим Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: mkavalerov@gmail.com.

В.А. Якимова, В.И. Фрейман

ИССЛЕДОВАНИЕ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ MPLS L2 VPN И MPLS L3 VPN

В данной статье рассмотрена актуальность применения технологий MPLS L2 VPN и MPLS L3 VPN при подключении удаленных офисов компаний. Приведены модель для исследований, результаты исследований и рекомендации по использованию оверлейных технологий.

Ключевые слова: оверлейные технологии, MPLS, VPN 2 уровня, VPN 3 уровня, виртуализация.

V.A. Yakimova, V.I. Freyman

RESEARCH AND COMPARING TECHNOLOGIES MPLS L2 VPN И MPLS L3 VPN

This article considers the possibility of using MPLS L2 VPN and MPLS L3 VPN technologies for connecting remote offices of companies. The article gave us a model for research, research results and recommendations for using of overlay technologies.

Keywords: Overlay technologies, MPLS, layer 2 VPN 2, layer 3 VPN, virtualization.

В современном мире технологии виртуализации стремительно завоевывают популярность. Виртуализация ресурсов информационных систем является главным драйвером изменения требований к сетевым инфраструктурам.

Актуальными становятся оценка эффективности применения технологий виртуализации, определение вариантов использования той или иной технологии.

Целью данной работы являются изучение и анализ оверлейных технологий, выбор программной среды для моделирования, построение модели, проведение исследований на основе построенной модели.

Данная цель предполагает решение следующих *задач*: рассмотрение технологий виртуализации, возможных сфер применения данных технологий, программных средств для моделирования, построение модели и исследование модели [1].

Для оказания услуг VPN у провайдеров появилась необходимость применения такого протокола, в котором не имеет значения, какие пакеты передаются по сети – IP, Ethernet, ATM, Frame Relay.

Основными применениями MPLS являются: MPLS L2VPN (виртуальная частная сеть на 2-м уровне) и MPLS L3VPN (виртуальная частная сеть на 3-м уровне).

После выбора технологий для исследования было необходимо выбрать среду моделирования. При выборе среды моделирования были рассмотрены три эмулятора оборудования: Cisco VIRL, GNS3 и UNetLab. Сравнив функционал выбранных эмуляторов, их достоинства и недостатки, был выбран эмулятор сети GNS3.

В качестве модели (рисунок) была эмулирована сеть провайдера, в задачу которого входит обеспечить связь L2 VPN и L3 VPN поверх сети MPLS между двумя офисами компаний в Перми и в Москве. Для построения сети были выбраны маршрутизаторы ядра сети маршрутизаторы Cisco c7200, клиентские маршрутизаторы Cisco c3745 [2].

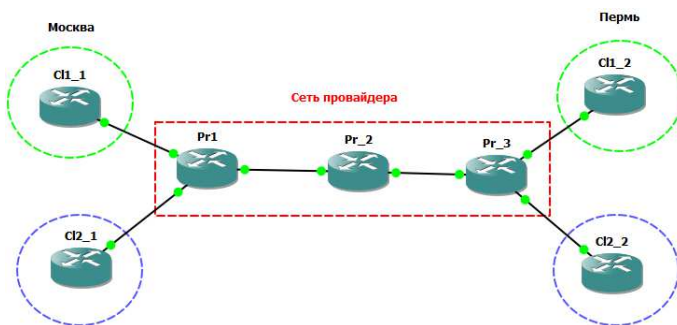


Рис. Модель сети в GNS3

Для оценки качества работы сети связи было необходимо определить метрики, которые позволят точно судить о системе связи в целом. Следующие метрики являются основными и опорными для оценки качества сетей и систем связи: пакетная пропускная способность, пропускная способность, потери фреймов, значение задержки, минимальный MTU, стоимость решения, сложность настройки.

При помощи команды `ttcp` была оценена пропускная способность между офисами клиентов. `Ttcp` вычисляет приблизительную пропускную способность в килобайтах в секунду. В нашем случае, пропускная способность 11250 Кбайт/с, что переводится как 90 000 Кбит/с ($11250 \text{ Кбайт/с} \cdot 8 \text{ бит/байт} = 90\,000 \text{ Кбит/с} = 90 \text{ Мбит/с}$) для MPLS L2 VPN. Пропускная способность 9960 Кбайт/с, что переводится как 79 680 Кбит/с ($9960 \text{ Кбайт/с} \cdot 8 \text{ бит/байт} = 79\,680 \text{ Кбит/с} = 79 \text{ Мбит/с}$) для MPLS L3 VPN для MPLS L3 VPN.

Пакетная пропускная способность во многом зависит от производительности. Кроме общей производительности выбор оборудования также должен быть обусловлен поддерживаемыми технологиями (табл. 1) [3].

Таблица 1

Сравнение производительности маршрутизаторов Cisco

Число тысяч пакетов в секунду (kpps)	Cisco 3725	Cisco 3660	Cisco 3745	Cisco 7200 с NPE-225/NPE-400
Fast switching	100	110	225	225-400
Process switching	7	10	18	13-20

Была рассчитана теоретически пропускная способность канала связи (табл. 2).

Таблица 2

Расчетное значение пропускной способности для маршрутизаторов

Параметры	Cisco 3745	Cisco 7200
Быстрая коммутация (БК)	225 kpps	300 kpps
Процессная коммутация (ПК)	18 kpps	20 kpps
Средний размер пакетов БК, мегабайт	$64 * 255000 = 16,32$	$64 * 300000 = 19,2$
Средний размер пакетов ПК, мегабайт	$64 * 18000 = 1,152$	$64 * 20000 = 1,28$
Пропускная способность БК, Mbps	$16,32 * 8 = 130,56$	$19,2 * 8 = 153,6$
Пропускная способность ПК, Mbps	$1,152 * 8 = 9,216$	$1,28 * 8 = 10,24$

Также был рассмотрен параметр MTU (maximum transmission unit), определяющий максимальный размер полезного блока данных одного пакета, который может быть передан протоколом без фрагментации [4] (табл. 3).

Таблица 3

Размер MTU на интерфейсе

Технология		Размер mtu на интерфейсе (байт)	
		Cisco	Juniper
MPLS	L3 VPN	1508	1526
	L2 VPN	1530	1548

Для исследования задержки была выбрана команда `ping` с ее возможностью отправлять пакеты разного размера, а также помечать их необходимыми битами в заголовке пакета. Для проверки канала в сеть отправлялись пакеты размером 100, 600, 1515, 2000 байт (табл. 4).

Таблица 4

Зависимость времени задержки от размера пакета
для схемы MPLS L3 VPN и MPLS L2VPN

Размер пакета, байт/ Технология	MPLS L3 VPN			MPLS L2 VPN		
	Min значение, мс	Среднее значение, мс	Max значение, мс	Min значение, мс	Среднее значение, мс	Max значение, мс
100	8	26	54	6	20	48
600	15	34	68	12	27	64
1515	—	—	—	34	52	100
2000	—	—	—	46	80	200

Был произведен расчет стоимости организации MPLS L2 VPN и L3 VPN. Данные по стоимости взяты с сайта оператора связи (табл. 5).

Таблица 5

Сравнение стоимости MPLS L2 VPN и MPLS L3 VPN

Параметры	L2 VPN	L3 VPN
Организация виртуального канала связи, рублей	2 900	3 900
Маршрутизатор Cisco 3745, по количеству офисов (2), рублей	—	$9\,350 \cdot 2 = 18\,700$
Стоимость организации абонентской линии от абонента до точки оператора (2), рублей	$1000 \cdot 2 = 2\,000$	$1000 \cdot 2 = 2\,000$
Единовременные затраты, рублей	4 900	24 600
Стоимость за канал 51,2 Мб/с в месяц, рублей	19 800	9 950
Стоимость за канал 51,2 Мб/с за год, рублей	237 600	119 400
Стоимость за канал 51,2 Мб/с за пять лет, рублей	1 118 000	597 000
Стоимость решения за год, рублей	242 500	144 000
Стоимость решения за пять лет, рублей	1 122 900	621 500

Как видно из расчетов, стоимость первоначальных вложений в решение отличается в 3–5 раз из-за необходимости приобретения маршрутизаторов в решении L3 VPN. Однако стоимость аренды канала связи в решении L3 VPN ниже, чем для аналогичного расстояния L2 VPN. Для обеспечения связности межрегиональных филиалов выгоднее использовать L3 VPN, однако в масштабах одного города или региона стоимость канала L2 VPN и L3 VPN практически не различается.

L2VPN дороже именно в силу своей универсальности. L2VPN либо очень слабомасштабируем, либо это сложный в настройке. Для соединения множества точек L2VPN использует VPLS, который чередует петлями.

L3VPN покрывает собой много сценариев, необходимых большинству заказчиков. Поэтому в большинстве случаев более оптимально использование L3. Использование L2 предполагает специфические случаи. Например, наличие специализированных устройств, которые не используют протокол IP, или небольшое ООО (или ИП) с двумя-тремя точками, которые хотят подключить в свою локальную сеть офис в другом конце города.

Сценарии использования для MPLS L3 VPN: протяженные межрегиональные сети, подключение более 5 офисов в разных городах, регионах.

Библиографический список

1. Якимова В.А., Фрейман В.И. Исследование и моделирование сетей, построенных на основе оверлейных // Автоматизированные системы управления и информационные технологии: материалы Краевой науч.-техн. конф., г. Пермь, 23 мая 2017 г. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исследоват. политехн. ун-та, 2017. – С. 361–366.

2. Якимова В.А., Фрейман В.И. Исследование и моделирование vpn сетей, построенных на основе технологии MPLS // Инновационные технологии: теория, инструменты, практика (InnoTech 2017): материалы IX Междунар. интернет-конф. молодых ученых, аспирантов и студентов, декабрь 2017. – Пермь, 2017.

3 Услуги операторов связи для создания корпоративных сетей передачи данных [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.jetinfo.ru/stati/uslugi-operatorov-svyazi-dlya-sozdaniya-korporativnykh-setej-peredachi> (дата обращения: 18.04.2018).

4 Telezon. Тарифы. Каналы связи VPN/VLAN [Электронный ресурс]. – URL: <http://telezon.ru/tariff/52> (дата обращения: 21.04.2018).

Сведения об авторах

Якимова Виктория Андреевна – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ТК3-16-1м, г. Пермь, e-mail: melevik@mail.ru.

Фрейман Владимир Исаакович – кандидат технических наук, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика» магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: vfrey@mail.ru.

Секция V
ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

А.Л. Погудин, С.А. Зыкин, С.С. Баранов

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ ЗАЩИТЫ И РЕЗЕРВИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННОГО И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АСУ ТП

Представленная статья посвящена рассмотрению методики контроля резервирования информационного и программного обеспечения АСУ ТП. Решение задачи подтверждается как статистическими данными, так и значительным перечнем научных трудов, посвященных вопросам контроля защиты и резервирования информационного и программного обеспечения АСУ ТП. В рамках статьи рассматриваются уязвимые места АСУ ТП. Рассмотрены угрозы опасности информационного и программного обеспечения АСУ ТП. Предложены варианты улучшения на информационном и программном уровне обеспечения контроля защиты АСУ ТП.

Ключевые слова: АСУ ТП, информационная безопасность, защита информационного обеспечения, защита программного обеспечения.

A.L. Pogudin, S.A. Zykin, S.S. Baranov

DEVELOPMENT OF THE METHODOLOGY OF CONTROL OF PROTECTION AND RESERVATION OF THE INFORMATION AND SOFTWARE OF THE MANAGEMENT INFORMATION SYSTEM

The presented article is devoted to the consideration of the method of reservation control information and software APCS. The solution of the problem is confirmed by both statistical data and a significant list of scientific works devoted to the control of the protection and reservation of information and software APCS. The article discusses vulnerabilities of control systems. Considered threats risk information and software control systems. Proposed options for improving information on and software control protection of APCS.

Keywords: ACS TP, security, information security, software protection.

Введение. В наши дни практически в любом производстве используются автоматизированные системы управления технологическими процессами. Однако автоматизация без выполнения требований информационной безопасности может быть критически опасной.

Сегодня многие эксперты сходятся в едином мнении, что основная угроза – это вмешательство враждебно настроенных групп в управление автоматизированными системами критически важных объектов, в том числе и с целью вывода их из строя.

Автоматизированная система управления технологическими процессами (АСУ ТП) – это целая группа технических и программных средств, предназначенных для автоматизации процессов управления технологическим оборудованием на промышленных предприятиях.

Системы безопасности АСУ ТП наиболее актуальны в развитых с точки зрения промышленной автоматизации отраслях — энергетики, нефтяной и газовой отрасли, транспорта, металлургии, машиностроении. Безопасность всей промышленной сети и АСУ ТП обеспечивается применением комплексного последовательного подхода, учитывающего специфику и особенности промышленных систем и основанного на требованиях и рекомендациях как международных стандартов, так и российских нормативных документов по обеспечению информационной безопасности промышленных систем.

Первое, что нужно понимать, – на внешние угрозы приходится от 40 до 70 % (зависит от отрасли).

Второе – в силу природы АСУ ТП нам необходимо в первую очередь рассматривать угрозы целостности и доступности [1].

В-третьих, нужно понять причины реализации угроз АСУ ТП и определить, на чем концентрировать внимание при проектировании и построении систем ИБ АСУ ТП. В таблице приведены (более детально) причины реализации угроз АСУ ТП.

Причины реализации угроз АСУ ТП

Причины реализации угроз ИБ	Наблюдались в среднем по предприятию, %	Категория угроз (использование приведенных уязвимостей)
Раскрытие конфигурационной и отладочной информации	40	Иное (нарушение административного режима)
Инъекции кода (SQL, File, Code)	37	Уязвимости ПО и протоколов
Небезопасная конфигурация веб-сервера	30	Ошибка конфигурации
Уязвимости DNS	22	Уязвимости ПО и протоколов
APR Cache Polsoning	21	Ошибка конфигурации
Некорректное распределение прав доступа	17	Ошибка конфигурации
Административный доступ по незащищенному протоколу	17	Ошибка конфигурации
Слабая парольная политика	16	Ошибка конфигурации
Уязвимости сетевого оборудования	13	Уязвимости ПО и протоколов
Небезопасная передача/хранение учётных данных	12	Ошибка конфигурации

Для минимизации ошибок конфигурации и вероятности реализации таких сценариев применяются организационные меры (регламенты, взаимный контроль, обучение персонала, делегирование, политики и процедуры).

Второй по популярности сценарий – использование уязвимостей программного обеспечения (ПО) для получения удаленного доступа, отказов в обслуживании, нарушения целостности. Здесь предсказуемость уже куда менее очевидна, и требуется более детальный анализ. В таких случаях также есть способы противодействия: контроль качества ПО, патч-менеджмент, анализ уязвимостей и всевозможные компенсирующие меры [3].

ИБ-решения для АСУ ТП. Перечислим подсистемы обеспечения информационной безопасности АСУ ТП:

- подсистема сетевой безопасности. Иногда ее делят на две системы – межсетевого экранирования и обнаружения вторжений. В таких случаях подразумевается, что в АСУ ТП будет внедрено дополнительное оборудование – межсетевые экраны и система обнаружения вторжений;

- подсистема двухфакторной (многофакторной) аутентификации;
- подсистема обеспечения целостности;
- подсистема быстрого восстановления конфигураций и данных;
- подсистема предотвращения утечек конфиденциальной информации;

- подсистема анализа защищенности;

Первые три ИБ-подсистемы являются ключевыми в АСУ ТП, поскольку позволяют наиболее эффективно сохранять доступность автоматизированной системы управления. Дело в том, что специфика АСУ ТП (приоритет доступности) не позволяет использовать ИБ-решения с большой интеллектуальной составляющей. Если для стандартной ИТ-системы приостановка какого-то процесса в случае подозрения на вредоносную активность является нормальной мерой, то в промышленных системах это может стать причиной техногенной катастрофы [2].

Приоритету доступности соответствует логика работы серийных ИБ-решений для АСУ ТП, которая принципиально отличается от логики соответствующих решений для ИТ-систем. Например, межсетевой экран для АСУ ТП, по сути, играет роль обычного ключа. В нем нет интеллектуальной составляющей, и он работает по заранее определенным правилам, которые настраиваются при внедрении. Одним

из распространенных подходов к построению ИБ-системы АСУ ТП является эшелонированная защита, которая включает в себя следующие уровни:

- физической безопасности;
- сетевой безопасности;
- безопасности рабочих станций и серверов;
- безопасности приложений (аутентификация, авторизация и аудит при доступе к приложениям);
- безопасности устройств (контроль над изменениями и ограничение доступа).

Особое внимание следует уделять сетевому уровню. Многие компоненты АСУ ТП подключены к сетевой инфраструктуре IP/Ethernet, но для них не всегда возможна установка средств обеспечения ИБ, таких как антивирусы или системы предотвращения вторжений на уровне хоста.

Иным путём повышения показателей надёжности программного обеспечения является введение некоторой избыточности в систему через резервирование [3].

По отношению к АСУ ТП принято выделять три типа резервирования:

- программное;
- временное;
- информационное.

Суть временного резервирования состоит в неоднократном повторении «ненадежных» программ и анализе полученных данных. Такое нагруженное резервирование позволяет устранять влияние случайных сбоев и выявлять случайные ошибки, требующие восстановления программ. Основой информационного резервирования ПО является дублирование данных. При необходимости они могут пройти дополнительную обработку. Суть программного резервирования заключается в организации двух или более различных программ, предназначенных для получения результата, или аналогичной функции. В целях обеспечения необходимого уровня надежности АСУ ТП необходимо учитывать ряд особенностей: в работе АСУ ТП участвует так называемый «человеческий фактор», который может в существенной степени влиять на уровень надежности в АСУ ТП.

Лучшим способом повышения надежности являются диагностический и эксплуатационный методы, они позволяют предупреждать отказы оборудования, основываясь на прогнозировании моментов их появления. На основании этого используют резервирование [3].

Наиболее частые уязвимости. Практически любая АСУ ТП уязвима, что может привести к нарушению корректной работы технологического процесса и реализации угроз несанкционированного доступа к информации:

- в системах диспетчерского управления и сбора данных (SCADA);
- отдельных интерфейсах управления объектами автоматизации;
- элементах телеметрической подсистемы и телемеханики;
- прикладных приложениях для анализа производственных и технологических данных;

Угрозы для АСУ ТП. В качестве некоторых основных угроз в области информационной безопасности для АСУ ТП можно выделить активное развитие вредоносного программного обеспечения, использование спама, кражу информации, проблемы, связанные с квалификацией работников компаний в области информационной безопасности [2].

Реализация системы информационной безопасности. АСУ ТП представляет собой комплексную задачу, решение которой должно выполняться на трех уровнях:

- административном;
- процедурном;
- на уровне программно-технических мер.

Административный уровень. Охватывает действия осуществляемые руководством предприятия.

Процедурный уровень. Направлен на человеческий фактор.

Уровень программно-технических мер. На этом уровне реализуется ряд сервисов обеспечения информационной безопасности – управление доступом, обеспечение целостности и т.д. [2].

Заключение. Результатом проведенной работы является не только всесторонний анализ методики контроля защиты и резервирования информационного и программного обеспечения АСУ ТП, но и решение ряда задач:

- рассмотрены угрозы безопасности ПО АСУ ТП;
- рассмотрены методы резервирования;

Библиографический список

1. Аникеенко В. Безопасность АСУ ТП и контроль привилегированных пользователей. – URL: <http://www.anti-malware.ru/node/11899> (дата обращения: 28.07.2018).
2. Воронцов А. Автоматизированные системы управления технологическими процессами // Воспр. безопасности: информ. бюл. комп. «Инфосистемы Джет». Информационная безопасность промышленных объектов. – URL: http://www.jetinfo.ru/jetinfo_arhiv/informatsionnaya-bezopassnost-promyshlennykh-obektov/2011 (дата обращения: 28.07.2018).
3. Лукацкий А. Стандарты безопасности АСУ ТП. – URL: <http://www.slideshare.net/CiscoRU/ss-8690963> (дата обращения: 28.07.2018).

Сведения об авторах

Баранов Степан Сергеевич – студент Лысьвенского филиала Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ЭВТ-14-16ЛФ, г. Лысьва, e-mail: baranov.stepan.1992@mail.ru.

Погудин Андрей Леонидович – кандидат технических наук, доцент Пермский национальный исследовательский политехнический университет, доцент кафедры «Информационные технологии и автоматизированные системы», г. Пермь, e-mail: pogudin_al@mail.ru.

Зыкин Сергей Анатольевич – старший преподаватель кафедры «Естественно-научные дисциплины» Лысьвенского филиала Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Лысьва, e-mail: zykin_sergey@mail.ru.

К.П. Васильев, М.А. Филиппов, А.С. Шабуров

УГРОЗЫ И ТЕХНОЛОГИИ ЗАЩИТЫ БЕСКОНТАКТНЫХ ПЛАТЕЖЕЙ

В данной статье рассматриваются проблема защиты банковских карт. Все чаще и чаще банки внедряют в использование современные технологии бесконтактных платежей. В качестве снижения рисков банки ограничили сумму покупок, при которой оплата не требует прохождения идентификации. Это приводит к увеличению времени обработки платежа, а значит, этот метод не имеет весомых преимуществ по сравнению со стандартными способами оплаты.

Ключевые слова: бесконтактные платежи, nfc, бесконтактные карты оплаты, безопасность платежей.

K.P. Vasilev, M.A. Filippov, A.S. Shaburov

THREATS AND PROTECTION TECHNOLOGY OF CONTACTLESS PAYMENTS

The article deals with the problem of bankcard protection. Increasingly, banks are adopting advanced technologies of contactless payments. To decrease risks, bank limit purchasing total and in such case identification by passage is not needed. This increases processing time of the payment. It means this method does not have significant advantage compared with conventional methods of payment.

Keywords: contactless pay, nfc, contactless pay card, payment security.

Введение в технологию бесконтактных платежей. Бесконтактная банковская карта – смарт-карта, в которую встроен чип с антенной, называемой RFID-меткой, передающий информацию о платеже по радиоканалу. Сама система бесконтактной оплаты построена на системе RFID – это способ идентификации объектов при считывании или записи данных (RFID-метки) посредством радиосигналов. В качестве физической основы механизма бесконтактных банковских платежей используется технология NFC [1].

В магазинах, принимающих подобные карты, установлен специальный POS-терминал. RFID-метка, встроенная в платежную карту, содержит сведения о номере и дате срока действия бесконтактной банковской карты, которые передаются считывателю в незашифрованном виде. Но в отличие от обычных карт RFID-метка не хранит сведения о CVV-коде. Для каждой последующей операции формируется динамический одноразовый CVV.

NFC работает на дистанции не более 10 см на частоте 13,56 МГц. Технология подразумевает обязательное наличие инициатора и цели. Инициатор генерирует активное поле, а цель считывает его в пассивном режиме.

Для совершения оплаты бесконтактной банковской картой её необходимо приложить к считывающему устройству на расстояние до 10 см. Проведение операции не требует ни введения ПИН-кода, ни подписи на чеке. Максимальная сумма транзакции всегда ограничена – по картам российских банков она составляет 1 тыс. рублей.

Угрозы бесконтактных платежей. Основной опасностью является утеря или кража банковской карты с возможностью бесконтактной оплаты. Деньги могут быть украдены с помощью перевода на чужой счет или потрачены в ближайшем магазине.

Платежные карты с NFC более безопасны, чем магнитная карта, но уступают в данном вопросе платёжным инструментам, содержащим только обычный чип. С помощью самодельных RFID-ридеров злоумышленник имеет возможность считать с карт посетителей торговых центров динамический CVV, а затем создавать их клон и использовать в своих целях. Спустя некоторое время, когда владелец карты попытается совершить оплату, система, обнаружив, что CVV уже использовали ранее, заблокирует доступ к счёту [2].

Так же испанские хакеры Рикардо Родригес и Хосе Вилла создали вирус для мобильной операционной системы Android. Они рассудили, что человек часто носит кошелек с карточками, поддерживающими технологию NFC со смартфоном. По сути, вирус делает телефон своеобразным ретранслятором сигнала банковской карты. И злоумышленник может оплатить покупку вашей картой, дождавшись, когда вирус отправит информацию о том, что карта готова к осуществлению транзакции. Такой вид взлома получил названием relay-атаки [2, 6].

Кроме того, считать карту возможно до того, как пользователь получит свою карту. В связи с тем, что бесконтактные карты выпускаются все чаще и чаще, вызывает опасения практика многих банков рассылать свои карты по почте. Недобросовестный сотрудник почтовой службы, вооружившись RFID-сканером, может получить номер и дату срока действия карты, кроме того, он будет знать имя и почтовый адрес ее владельца, а ведь этих данных в некоторых случаях достаточно для совершения покупки через Интернет.

Для контактирования с чипом возможно сделать необычный считыватель, который работает на большей дистанции. Так, исследователи

из британского университета показали возможность считывания с помощью NFC данные на расстоянии до 80 см с помощью небольшого сканера [3]. Такое устройство вполне может незаметно обращаться к бесконтактным картам в общественном транспорте, торговых центрах, аэропортах и тому подобных местах скопления людей. Тем более в некоторых странах подходящие карты лежат в бумажнике уже у каждого второго гражданина.

С распространением технологии NFC в смартфонах российские банки начали поддерживать технологию бесконтактной оплаты с помощью платежного приложения на смартфонах. Чтобы обезопасить NFC-платежи пользователю смартфона с технологией HCE важно учесть риски [4]:

- получение прав суперпользователя сторонними приложениями на Android-смартфоне, если устройство поддерживает Root-доступ. Пользователю не следует активировать Root-доступ на устройстве, на котором хранятся данные карты, и используется приложение для NFC-платежей;

- установка вредоносного ПО, от которого помогут защититься бдительность владельца и проверка данных о разработчике мобильного приложения перед установкой на устройство;

- потеря или кража телефона, на котором не установлена блокировка по паролю или отпечатку пальца. Чтобы избежать этого риска, владельцу телефона следует хранить устройство в надежном месте и защитить его с помощью блокировки.

Технологии защиты. Основой для защиты являются организационно-правовые аспекты. Стандартом (включить в литературу ГОСТ Р ИСО/МЭК 14443-1-2013) требования к проведению бесконтактных транзакций имеют очень жесткие рамки для ее обработки – 500 мс. Ровно столько времени есть у терминала и карты, чтобы познакомиться, обсудить свои вопросы и принять верное решение. И столько же времени есть у мошенника, чтобы списать определенную сумму с вашей карты. Таким образом, создаются преграды для совершения злоумышленником действий. Также, политиками безопасности установлен лимит на расход средств в 1000 рублей. Если же вы желаете приобрести более дорогой товар, необходимо будет контактным способом ввести защитный код или оставить свою подпись на чеке [5]. С точки зрения физических средств защиты рекомендовано использование защитного чехла с так называемым эффек-

том устройства клетки Фарадея, который обезопасит карту от случайных незапланированных воздействий. Специальные чехлы, которые выдаются в банках вместе с картой, закрывают собой микрочип для произведения оплат и препятствуют несанкционированному воздействию на NFC-чип.

Для создания барьера злоумышленнику существует возможность изменить строение смарт-карты. Для этого понадобится усовершенствовать карту и внести этап предактивации RFID-метки для совершения платежей. К примеру, изменив электрическую схему карты, будет возможна установка кнопки, при нажатии которой RFID-метка будет доступна для использования, иначе – взаимодействие с антенной для передачи данных не будет представляться возможным. Используя такой подход, можно заменить кнопку на любой метод идентификации для повышения уровня защиты, например, используя биометрический сканер отпечатка пальца.

Другой технологией защиты является использование не самой платежной карты для совершения платежей, а мобильного приложения, которое привязано к счету карты. Безопасность такого способа оплаты поддерживает технология HCE. С ее помощью мобильное устройство с поддержкой бесконтактных платежей передает данные о платежной операции через канал, защищенный при помощи шифрования. Данные, которые необходимы для бесконтактного платежа, хранятся в памяти смартфона или планшета. Такая модель работы значительно снижает вероятность симуляции NFC-платежа и перехвата данных злоумышленниками. Если пользователь не активировал мобильное приложение, используя методы идентификации своей личности, атака с использованием ретрансляции невозможна. В дополнение, все операции производятся с виртуального счета, создаваемого самим приложением, что создает дополнительную защиту истинной платежной карты [4].

С точки зрения платежной системы взаимодействие участников не отличается от обычной оплаты по карте. POS-терминал подключен к хосту процессинговой системы банка и формирует запросы на авторизацию транзакций оплаты. Процессинговая система банка направляет запросы на авторизацию, например, в платежную систему Visa, которая маршрутизирует запросы на процессинговую систему банка-эмитента. Полученный ответ по цепочке возвращается на терминал. Пользователь ставит на свой смартфон программу для прове-

дения бесконтактных транзакций. Канал между смартфоном и сервером банка защищен. В системе используется технология SSL-pinning. Это означает, что SSL-сертификат, используемый на сервере, внедрен непосредственно в приложение. Стандартное хранилище сертификатов Android не используется, поэтому риск подмены сертификата существенно снижается. Кроме того, данные, передаваемые в приложение, шифруются ключом, загружаемым с сервера. По защищенному каналу связи между процессинговой системой банка и смартфоном в приложение загружаются детали банковской карты Visa. Если в телефоне есть чип NFC и режим HCE (Host Card Emulation) поддерживается, то дополнительно в приложение загружается ключ, которым будет подписана криптограмма транзакции. Принятый ключ также как и детали карты, хранится в защищенном хранилище в памяти смартфона. В целях безопасности ключ периодически меняется. Взаимодействие с терминалом производится согласно описанной выше схеме qVSDC. В отличие от аппаратной реализации на чипе все вычисления, а также генерация криптограммы ТС выполняются программно [7].

Библиографический список

1. Аналитика и полезная информация [Электронный ресурс] // Технология NFC в смартфонах и ее практическое использование <http://www.ixbt.com/mobile/nfc-2013.shtml> (дата обращения: 10.05.2018).
2. Бирюков В. Деньги из воздуха: безопасны ли бесконтактные платежи? [Электронный ресурс]. – URL: <https://blog.kaspersky.ru/contactless-payments-security/8608/> (дата обращения: 10.05.2018).
3. Peter La. University of Surrey [Электронный ресурс] // Бесконтактные платные карты: основные моменты исследования проблем в области безопасности. – URL: http://www.surrey.ac.uk/mediacentre/press/2013/114636_contactless_payment_cards_research_highlights_security_concerns.htm (дата обращения: 10.05.18).
4. Коженко Максим. Vc.ru [Электронный ресурс]: Безопасны ли бесконтактные платежи? – URL: <https://vc.ru/30473-bezopasny-li-beskontaktnye-platezhi> (дата обращения: 10.05.18).
5. ГОСТ Р ИСО/МЭК 14443-1-2013. Карты идентификационные. Карты на интегральных схемах бесконтактные. Карты близкого действия. Ч. 1; Физические характеристики. – М: Изд-во стандартов, 2014. – 8 с.

6. Harbison C. iDigitalTimes [Электронный ресурс] // Новые Андроид-НФС атаки могут красть деньги с кредитной карты в любой момент, когда ваш телефон находится поблизости. – URL: <http://www.idigitaltimes.com/new-android-nfc-attack-could-steal-money-credit-cards-anytime-your-phone-near-445497> (дата обращения: 10.05.18).

7. Анохина К. Осторожно! Бесконтактные платежи [Электронный ресурс]. – М., 2016. – URL: <http://www.itsec.ru/articles2/in-chsec/ostorozhno-beskontaktnye-platezhi> (дата обращения: 10.05.18)

Сведения об авторах

Васильев Кирилл Павлович – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КОБ-14, г. Пермь, e-mail: kirill.vasiljev@ya.ru.

Филиппов Михаил Александрович – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КОБ-14, г. Пермь, e-mail: Misha-Fill@mail.ru.

Шабуров Андрей Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: shans@at.pstu.ru.

Е.А. Митюков

ПРАКТИКА ПРИМЕНЕНИЯ REVERSE-PROXY ДЛЯ ЗАЩИТЫ КОРПОРАТИВНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ В ИНТЕРНЕТЕ

Представлена необходимость публикации сервисов компании в Интернет. Выявлена проблема необходимости защиты сервисов, опубликованных в Интернете. Рассмотрены 3 архитектуры для обеспечения соответствующего уровня защищенности сервисов. Отмечены достоинства и недостатки предложенных подходов.

Ключевые слова: информационная безопасность, трансляция сетевых адресов, обратный прокси, межсетевой экран, демилитаризованная зона.

Е.А. Mityukov

THE PRACTICE OF APPLYING A REVERSE-PROXY TO PROTECT ENTERPRISE APPLICATIONS ON THE INTERNET

An importance to publish of enterprise services to Internet is shown. A problem of published services protection is substantiated. Three levels of protection of the services are considered. Advantages and disadvantages of the proposed approaches are noted.

Keywords: information security, network address translation, reverse proxy, firewall, demilitarize zone.

В связи с постоянным развитием систем передачи информации, вычислительных средств и информационных технологий в целом ни одна из компаний не обходится без публикации внутренних сервисов в Интернете. Это позволяет сотрудникам компаний получать почту с внешних источников, пользоваться VPN-подключениями для удалённой работы, получать доступ к корпоративным системам из любой точки мира. Любой опубликованный сервис должен иметь соответствующий уровень защиты от внешних атак для снижения рисков компрометации данных компании и в том числе рисков, связанных с проникновением в локальную сеть предприятия.

Рассмотрим типичную архитектуру для обеспечения минимального уровня защиты сервиса, опубликованного в Интернете, на примере публикации сайта. Типовая архитектура включает в себя межсетевой экран в любой доступной реализации и сервер приложений (в данном случае *backend*-сервер) (рис. 1).



Рис. 1. Типовая архитектура

Здесь *backend*-сервер не имеет прямого подключения к Интернету, так как использован межсетевой экран, позволяющий блокировать нелегитимный трафик и скрыть локальный *IP*-адрес *backend*-сервера. Подобная архитектура используется часто, но в случае компрометации межсетевого экрана злоумышленник попадает в корпоративную сеть передачи данных и дальше уже ничто не ограничивает развитие его атаки. Более защищенной является архитектура с размещением в демилитаризованную зону сети (*DMZ*)¹ *backend*-сервера (или любого другого сервера, с которого необходимо опубликовать сервис) и межсетевого экрана (рис. 2).

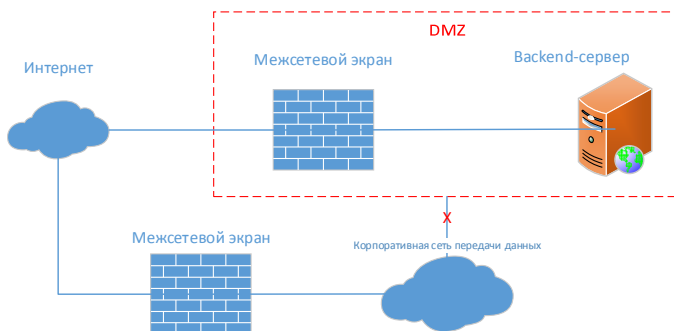


Рис. 2. Архитектура с использованием DMZ

В данном случае, если злоумышленнику удастся получить доступ к межсетевому экрану и в том числе к *backend*-серверу, дальнейшее развитие атаки становится проблематичным, поскольку прямого доступа в сеть предприятия из этого сегмента нет. Но остаётся проблема предоставления доступа к опубликованному ресурсу пользователям изнутри корпоративной сети, у которых отсутствует доступ в Интернет.

¹ Сегмент сети с белой адресацией, отделённый от Интернета и локальной сети организации.

Следующая архитектура представляет из себя два *backend*-сервера (первый с *reverse-proxy*², второй с обычным функционалом, как в 1-м и 2-м вариантах), два межсетевых экрана (с NAT) без использования *DMZ* и с разделением сетевых сегментов на уровне *VLAN* либо на уровне сетевых диапазонов (рис. 3).

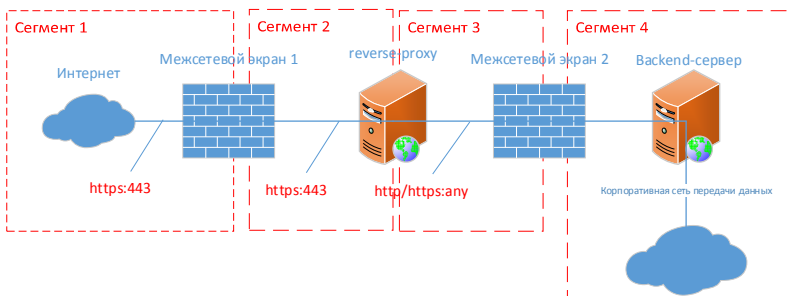


Рис. 3. Архитектура с использованием *reverse-proxy*

Для простоты реализации в предложенной архитектуре использовано 4 разных сетевых сегмента с соответствующей *IP*-адресацией, которая не пересекается между сегментами:

- сегмент, состоит из внешнего диапазона адресов, в этом диапазоне находятся *IP*-адреса, которые не входят в выделенные IANA локальные диапазоны 10.0.0.0/8; 100.64.0.0/10; 172.16.0.0/12; 192.168.0.0/16;
- диапазон 1, адреса из сети 192.168.1.0/24;
- диапазон 2, адреса из сети 192.168.2.0/24;
- диапазон 3, адреса из сети 192.168.3.0/24.

Важно отметить, что оборудование настроено таким образом, что каждый сегмент изолирован друг от друга, а связь между сегментами осуществляется за счет 2 сетевых адаптеров на каждом из узлов. Допускается пересечение *IP*-адресов, но в случае пересечения – затрудняются логирование и администрирование подобной архитектуры в целом.

В свою очередь, работа данной архитектуры представлена следующим образом:

² Обратный прокси – промежуточный сервер, который принимает запросы клиентов и ретранслирует их на серверы в корпоративной сети передачи данных, затем передаёт ответы обратно клиентам.

1. Пользователь открывает браузер и переходит по ссылке, ведущей к заранее опубликованному сервису, например, *https://example.com*. Получает *IP*-адрес от *DNS*-сервера, и в результате формируется запрос к серверу по протоколу *https* на порт 443.

2. Пришедший к серверу запрос создаёт сессию между клиентом и первым межсетевым экраном. Затем запрос предварительно обрабатывается межсетевым экраном, поскольку на нём настроено правило трансляции адресов (*NAT*) для всех клиентов, с внешнего *IP*-адреса и порта 443 на внутренний *IP*-адрес и порт 443. Как следствие, это *NAT*-правило срабатывает, и далее трафик запроса попадает в сеть с *reverse-proxy*.

3. Затем *reverse-proxy* обрабатывает полученный запрос, попутно делает подмену *URL* внутри запроса с *https://example.com* на *https://example.local.comodo.com* и пропускает запрос дальше.

4. Следующим обработку начинает второй межсетевой экран, на котором так же используются правила *NAT* для трансляции адресов из одного сетевого сегмента в другой.

5. И, наконец, запрос доходит до *backend*-сервера с *URL* *https://example.local.comodo.com*.

6. В обратную сторону для отправки ответа клиенту схема работает точно так же, только *reverse-proxy* преобразует *URL* в первоначальный вид, который получен при запросе пользователем.

Несмотря на явный недостаток в необходимости дополнительно оборудования для реализации данной архитектуры, сама архитектура имеет ряд преимуществ перед другими:

- уменьшение нагрузки, поскольку большинство реализаций *reverse-proxy* может равномерно распределять запросы на *backend*-серверы;
- обеспечение безопасности, так как *reverse-proxy* может скрывать существование опрашиваемых им *backend*-серверов;
- увеличение производительности, так как при правильно выбранном *reverse-proxy* имеется возможность управлять статическим контентом (изображениями, *CSS* и т.п.);
- простота аудита и логирования с использованием единой точки доступа (порт 80 и 443).

Как правило, обеспечение должного уровня безопасности усложняет жизнь конечному пользователю. Однако предложенная третья архитектура абсолютно «прозрачна» для пользователей, а потому

не создает им проблем. Архитектура обеспечивает высокий уровень безопасности и уменьшает векторы потенциальных атак. Следовательно, несмотря на сложность и дополнительные затраты на оборудование, можно рекомендовать для защиты опубликованных в Интернет корпоративных сервисов именно ее.

Библиографический список

1. Митюков Е.А., Затонский А.В., Плехов П.В. Аудит безопасности SCADA-систем // Защита информации. Инсайд. – 2016. – № 4. – С. 72–77.

2. Митюков Е.А. Уязвимости MS SQL server, или использование хранимых процедур в своих целях // Защита информации. Инсайд. – 2017. – № 6(78). – С. 44–47.

3. Затонский А.В. Информационные технологии: Разработка информационных моделей и систем. – М.: ИЦ Риор, 2014. – 344 с.

Сведения об авторе

Митюков Евгений Алексеевич – аспирант кафедры «Информационные технологии и автоматизированные системы» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: the_nomad@mail.ru.

А.С. Никитин, Е.Л. Кротова

ОБЗОР АЛГОРИТМА КВАДРАТИЧНОГО РЕШЕТА ДЛЯ ФАКТОРИЗАЦИИ ЦЕЛЫХ ЧИСЕЛ

В данной статье рассматривается один из самых быстрых алгоритмов для факторизации целых чисел – алгоритм квадратичного решета.

Ключевые слова: алгоритм квадратичного решета, алгоритм факторизации Ферма, факторизация, криптография.

A.S. Nikitin, E.L. Krotova

REVIEW OF QUADRATIC SIEVE ALGORITHM FOR INTEGERS FACTORING

In this article considers one of the fastest algorithms for factoring integers - the quadratic sieve algorithm.

Keywords: quadratic sieve, Fermat's factoring algorithm, integer factoring, cryptography.

Введение. Задача факторизации целых чисел – одна из самых важных в криптографии. Широко используемые криптографические алгоритмы с открытым ключом RSA генератора псевдослучайных чисел Блюм–Блюма–Шуба и другие основаны на предположении, что факторизация больших целых чисел – вычислительно сложная задача. Но что, если эту задачу окажется легко решить?

В 1977 г. в колонке Мартина Гарднера в журнале Scientific American появился RSA-129 challenge: задача о разложении 129-значного числа на множители. Ривест, один из создателей RSA, тогда подсчитал, что факторизация даже 125-значного числа займёт 40 квадриллионов лет. Однако RSA-129 был успешно взломан, и в первую очередь это результат успешных исследований в области факторизации целых чисел.

Ведутся разработки различных методик факторизации чисел за полиномиальное время, однако пока не известен алгоритм, способный факторизовать достаточно большое число в разумные сроки.

Самый быстрый алгоритм для факторизации чисел, в записи которых используется менее 110 знаков, – метод квадратичного решета

(quadratic sieve, QS), для больших чисел разработан общий метод решета числового поля (general number field sieve, GNFS).

Метод факторизации Ферма. Будет удобно показать преимущества метода квадратичного решета, сравнивая его с самым простым подходом – методом факторизации Ферма.

Для факторизации некоторого n находятся такие числа A и B , что $A^2 - B^2 = n$, раскладывая разность квадратов, получаем разложение: $n = (A - B) * (A + B)$.

Если такое разложение существует, то справедливо, что $A^2 - n = B^2$, где A и B – некоторые целые числа.

В этом и заключается суть метода: перебирать все варианты A , такие, что $A^2 - n$ является полным квадратом. Поиск начинается с $A = \lfloor \sqrt{n} \rfloor + 1$ – наименьшего числа, такого, что $A^2 - n$ положительно. Когда найден подходящий A , проверяется, является ли $(A - B) * (A + B)$ подходящим, т.е. нетривиальным разложением.

Если нет, продолжается поиск подходящих вариантов дальше. По сути, проводится простой перебор, и для больших n это требует чрезвычайно много времени.

Подход Крейтчика. Морис Крейтчик предложил вместо поиска чисел A и B , когда $A^2 - B^2 = n$, что происходит в методе факторизации Ферма, искать более общее соотношение, $A^2 \equiv B^2 \pmod{n}$.

Крейтчик заметил, что если взять числа вида $x^2 - n$ и перемножить некоторые из них, получим полный квадрат. Обозначим его как X^2 . Введём $Y^2 = \prod x_i$, произведение таких x_i , что $X^2 = \prod (x_i^2 - n)$. Тогда $X^2 - Y^2$ кратно n , т.е. выражение $(X + Y) * (X - Y)$ – факторизация некоторого числа, кратного n . Чтобы получить делители самого n , достаточно вычислить НОД $(X + Y, n)$ и НОД $(X - Y, n)$. Так же, как и в методе Ферма, делители могут оказаться тривиальными. Тогда следует найти другую пару X и Y .

Как же получить из некоторого множества чисел набор таких, произведение которых даёт полный квадрат?

Воспользуемся основной теоремой арифметики. Разложим каждое число из множества на простые. Заметим, что когда мы перемножаем два числа, мы складываем показатели степеней простых чисел, входящих в их разложение. Заметим также, что число является полным квадратом только тогда, когда каждая степень простого числа, входящего в его разложение, – чётная. Введем в соответствие каждому числу вида $x^2 - n$ вектор, где i -е число обозначает степень i -го

простого числа, участвующего в разложении из некоторого множества простых чисел, называемого факторной базой. Так как нас интересует только то, является ли степень простого числа из разложения или нет, предлагается вычислять компоненты вектора по модулю 2.

Таким образом, мы перешли от задачи нахождения такого подмножества чисел, произведение которых даёт полный квадрат к нахождению из всего множества векторов таких, сумма которых даёт нулевой вектор.

Иначе говоря, необходимо решить такое уравнение $Ax = 0$, где A – матрица, составленная из векторов, обозначающих разложение чисел на простые, x – вектор, показывающий, какие именно числа нужно перемножить для получения полного квадрата.

Однако для приведения задачи факторизации к задаче решения системы линейных уравнений нужно, чтобы длины всех векторов совпадали. Для этого введём параметр B , определяющий размер факторной базы, и будем оперировать только -гладкими числами вида $x^2 - n$, т.е. числами, гладкими факторной базе, только такими числами, которые раскладываются на множители числами, входящими в факторную базу.

Следует заметить, что чем меньше множество чисел вида $x^2 - n$ и параметр B , тем быстрее работает алгоритм. Однако если взять эти параметры слишком малыми, СЛАУ, составленная из векторов, возможно, не будет иметь подходящего решения.

Для ускорения работы алгоритма можно исключить из факторной базы такие p_i , которые точно не являются делителями чисел вида $x^2 - n$, т.е. таких p_i , для которых n является квадратичным невычетом. Для этого достаточно воспользоваться вычислением символа Лежандра:

$\left(\frac{n}{p}\right) = n^{\frac{p-1}{2}} \pmod{p}$, в данном случае, нам нужны только такие p , для которых выполняется равенство $\left(\frac{n}{p}\right) = 1$. Докажем справедливость приведённой формулы. Поскольку n является квадратичным вычетом для некоторого p , то по определению $\exists x : x^2 \equiv n \pmod{p}$, значит, $n^{\frac{p-1}{2}} \equiv (x^2)^{\frac{p-1}{2}} \pmod{p}$, а $(x^2)^{\frac{p-1}{2}} = x^{p-1} \equiv 1 \pmod{p}$ по малой теореме Ферма.

Подход Померанца. Остаётся нерешенной задача получения векторов, определяющих то, как раскладывается некоторое число на произведение простых.

Для этого Карлом Померанцем был предложен способ просеивания чисел, похожий на решето Эратосфена. Померанц заметил, что если для некоторого p_i из факторной базы было найдено такое $x^2 - n$, которое делится на p_i , то все последующие числа вида $(x + kp)^2 - n$, где k – некоторое целое, тоже будут делиться на p_i , так как $(x + kp)^2 - n = x^2 + 2kp + k^2p^2 - n = (x^2 - n) + p(2k + k^2p)$.

Помимо этого было доказано, что таких последовательностей всегда 2, если они вообще существуют.

Для того чтобы не перебирать числа, можно найти такие два $x^2 - n$, которые делятся на p_i , и идти по всем числам с шагом p_i . Для нахождения таких чисел есть несколько способов, например алгоритм Тонелли — Шенкса.

Затем нужно пройтись по всем таким числам, которые делятся на каждый p_i из факторной базы, и поделить их на p_i или его степень. После деления чисел на все простые из факторной базы, те из них, которые станут единицами, будут гладкими для факторной базы.

Именно их следует раскладывать на множители, формируя векторы, используемые для формирования СЛАУ.

Пример разложения числа методом квадратичного решета. В качестве иллюстрации рассмотренного метода попробуем разложить некоторое число $n = pq$, где p и q – простые числа. Пусть, $n = 750513679$. Возьмём $B = 50$, т.е. наибольшее число в факторной базе – 47. Изначальное множество простых: $\{2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 29, 31, 37, 41, 43, 47\}$.

Исключим из этого множества такие p_i , для которых n является квадратичным невычетом: $\{7, 13, 17, 19, 31, 37, 43\}$.

Получаем факторную базу, по которой будем раскладывать числа вида $x^2 - n$: $\{2, 3, 5, 11, 17, 23, 29, 43, 47\}$.

Сформируем решето: множество чисел вида $x^2 - n$. Возьмём $3 \cdot 10^5$ таких чисел. Найдём для каждого p_i такие x , что $x^2 \equiv n \pmod{p}$, для каждого $p \neq 2$ существует два таких x . Например, для $p = 43$ решением уравнения будет 8 и 35. Значит, идём по всем числам вида $(8 + 43k)^2 - n$ и $(35 + 43k)^2 - n$ и делим нацело на наибольшую возможную степень числа 43. Аналогично для всех остальных чисел из факторной базы. Те числа, которые в итоге стали единицами, были гладкими нашему квадратичному решету.

Сформируем множество всех гладких чисел факторной базе из решета: $\{76566402, 93795570, 176810625, 210672330, 310747250,$

498260565, 881403930, 1032268050, 5585805522, 10850284170, 11611590546, 12167399970, 18240255570, 63550781250, 86267996442}.

Для всех гладких чисел сформируем векторы, определяющие их разложение по факторной базе, где компоненты вектора взяты по модулю 2. Например, числу 76566402 соответствует вектор $(0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 0)$.

Составляем СЛАУ и пытаемся решить $Ax = 0$:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} x = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Одним из решений является $x =$

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Решению соответствует множество гладких чисел: $\{29057, 30452, 253577\}$. Получаем X и Y :

$$X = \prod x_i = 224376027143828; Y = \prod (x_i^2 - n) = 32464281093750.$$

Получаем разложение n :

$$\text{НОД}(X + Y, n) = \text{НОД}(256840308237578, 750513679) = 34613$$

$$\text{НОД}(X - Y, n) = \text{НОД}(191911746050078, 750513679) = 21683$$

Проверяем: $34613 * 21683 = 750513679$, действительно, получено верное разложение.

Библиографический список

1. Агафонова И.В. Факторизация больших целых чисел и криптография [Электронный ресурс]. – URL: <http://dha.spb.ru/PDF/cryptoFACTOR.pdf> (дата обращения: 04.05.2018)

2. Ишмухаметов Ш.Т. Методы факторизации натуральных чисел – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2011.– 190 с.

Сведения об авторах

Никитин Алексей Сергеевич – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КОБ-15-1с, г. Пермь.

Кротова Елена Львовна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Высшая математика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: lenkakrotova@yandex.ru.

Н.Р. Осипов, А.Н. Каменских

БЕЗОПАСНОСТЬ РАДИОКАНАЛА В АВТОСИГНАЛИЗАЦИЯХ

В данной статье рассматривается проблема безопасности радиоканала в автосигнализациях. Современный мир невозможно представить без автотранспорта. Автобусы, микроавтобусы, автомобили, мотоциклы, скутеры, и это далеко не полный список. Статистика показывает, что в мире количество автотранспорта превысило отметку в один миллиард. Конечно, большинство автовладельцев защищает своё имущество и пользуется охранными комплексами. Однако, вопрос защищенности самих таких комплексов от взлома рассмотрен не в полной мере. При таких объемах автотранспорта данная проблема является актуальной во всем мире.

Ключевые слова: автосигнализация, безопасность радиоканала, keeloq.

N.R. Osipov, A.N. Kamenskih

SAFETY OF THE RADIO CHANNEL IN CAR ALARMS

This article deals with the security of the radio channel in car alarms. The modern world can not be imagined without motor transport. Buses, minibuses, cars, motorcycles, scooters and this is not a complete list. Statistics show that in the world the number of vehicles has exceeded the one billion mark. Of course, most car owners protect their property and use security systems. However, the issue of the security of such complexes from hacking is not fully considered. With such volumes of vehicles, this problem is relevant all over the world.

Keywords: car alarm, radio channel security, keeloq.

Целью данной работы является рассмотрение безопасности радиоканала в охранных комплексах автосигнализаций.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- 1) изучить историю развития технологии кодирования в автосигнализациях;
- 2) рассмотреть возможные сценарии атаки на радиоканал автосигнализации;
- 3) сформулировать основные проблемы современных автосигнализаций и предложить пути их решения.

История развития технологий кодирования. В устаревших сигнализациях применялись коды с числом комбинаций до 512. Подбор такого кода занимает менее 1 минуты. Количество комбинаций

кодов в современных сигнализациях может достигать нескольких тысяч миллионов.

На смену этим кодам пришел динамический код Keeloq, предложенный компанией Microchip. Технология динамического кодирования делает невозможным простой перебор комбинаций благодаря внедрению «антисканирующей» паузы. После нескольких неправильных попыток система берет тайм-аут и не реагирует на запросы. Кроме того, динамический код делает невозможным перехват кодовой посылки из эфира. Действительный код шифруется так, что в эфире совсем другая посылка, а в приемнике посылка расшифровывается и обрабатывается. Перехват кодов становится бессмысленным потому, что каждая следующая посылка значительно отличается от предыдущей.

В основе технологии Keeloq лежит использование секретных кодирующих и декодирующих ключей. Кодовая посылка формируется из следующих структур данных:

- кодирующий ключ – 64-битовая комбинация, генерируемая из серийного номера и 64-битового ключа изготовителя. Причем само значение ключа никогда не передается и не может быть перехвачено.

- счетчик синхронизации – 16-битовая комбинация счетчика, передаваемая при каждом нажатии кнопки на брелоке;

- дискриминатор – 12-битовая произвольная комбинация, передаваемая в закодированном виде в составе переменной части посылки. Используется для проверки целостности процесса декодирования;

- серийный номер кодера (брелока-передатчика) – 28/32-битовая комбинация. Передается в некодированном виде в постоянной части посылки [4].

Разбор алгоритмов атаки. Современные системы безопасности автомобиля включают в себя множество функций. Имобилайзеры, блокираторы дверей, капота, датчики объема, движения, удара, блокировка руля – все эти средства, несомненно, защищают от злоумышленника. Однако управление всей системой в целом производится по широкополосному радиоканалу. Таким образом, любой, находящийся по близости человек теоретически может перехватить управление всем охраняемым комплексом. Такой вид атак называется атака посредника, или атака «человек посередине».

Атака обычно начинается с прослушивания канала связи и заканчивается тем, что злоумышленник пытается подменить перехва-

ченное сообщение, извлечь из него полезную информацию, перенаправить его на какой-нибудь внешний ресурс.

Рассмотрим на примере. Предположим, что Алиса хочет передать Бобу некоторую информацию. Мэлори хочет перехватить сообщение и, возможно, изменить его так, что Боб получит неверную информацию.

Мэлори начинает свою атаку с того, что устанавливает соединение с Бобом и Алисой, при этом они не могут догадаться о том, что кто-то третий присутствует в их канале связи. Все сообщения, которые посылают Боб и Алиса, приходят Мэлори.

Алиса просит у Боба его открытый ключ. Мэлори представляет Алисе Бобом и отправляет ей свой открытый ключ. Алиса, считая, что это ключ Боба, шифрует им сообщение и отправляет его Бобу. Мэлори получает сообщение, расшифровывает, затем изменяет его, если нужно, шифрует его открытым ключом Боба и отправляет его ему. Боб получает сообщение и думает, что оно пришло от Алисы:

1. Алиса отправляет Бобу сообщение, которое перехватывает Мэлори:

Алиса *«Привет, Боб, это Алиса. Пришли мне свой открытый ключ.»* → Мэлори Боб

2. Мэлори пересылает сообщение Бобу; Боб не может догадаться, что это сообщение не от Алисы:

Алиса Мэлори *«Привет, Боб, это Алиса. Пришли мне свой открытый ключ.»* → Боб

3. Боб посылает свой ключ:

Алиса Мэлори ← *[ключ Боба]* Боб

4. Мэлори подменяет ключ Боба своим и пересылает сообщение Алисе:

Алиса ← *[ключ Мэлори]* Мэлори Боб

5. Алиса шифрует сообщение ключом Мэлори, считая, что это ключ Боба, и только он может расшифровать его:

Алиса *«Встречаемся на автобусной остановке!»* *[зашифровано ключом Мэлори]* → Мэлори Боб

6. Мэлори расшифровывает сообщение, читает его, модифицирует его, шифрует ключом Боба и отправляет его:

Алиса Мэлори *«Жди меня у входа в музей в 18:00.»* *[зашифровано ключом Боба]* → Боб

7. Боб считает, что это сообщение Алисы [6].

Кроме того, существуют модификации атаки «человек посередине», такие как атака повторного воспроизведения. Для реализации данного типа атаки требуются специальные технические средства, называемые «кейлогер» и «кодграббер». Кодграббер – устройство для взлома сигнализации. Оно может перехватить сигнал брелка владельца машины, который позже можно будет использовать для отключения сигнализации. Кодграббер бывает трёх видов: алгоритмический, кодграббер с замещением и кодграббер с ретрансляцией [7].

Проблемы современных автосигнализаций и возможные пути решения. Главной проблемой безопасности автосигнализаций на сегодняшний день являются криптостойкость алгоритма шифрования кодовых посылок, а также сам процесс управления.

Развитие отрасли микроэлектроники позволяет при тех же габаритах брелока сигнализации поместить большую вычислительную мощность, а значит, появляется возможность использовать более сложные алгоритмы шифрования. Также для предотвращения атаки повторного воспроизведения производители сигнализаций вводят метку времени жизни ключа, что позволяет отбрасывать ключи по истечении некоторого времени.

Однако использование только лишь более криптостойких алгоритмов даёт временную отсрочку, ведь устройства взлома с каждым днем становятся всё более производительными. Поэтому необходимо искать другие варианты передачи управляющих команд.

Существуют на рынке сигнализаций необычные решения, такие как, например Guard RF325-A. Роль идентификатора владельца играет миниатюрная электронная капсула, вклеенная в корпус брелка сигнализации, расстояние считывания которой составляет до 5 см. Так что, даже если угонщик сможет без ведома владельца снять авто с охраны, завести двигатель не получится [8].

В качестве одного из вариантов решения существующих проблем безопасности можно внедрять биометрическую систему защиты или оптическое распознавание водителя. Другим направлением может стать разделение функций охранной сигнализации. Например, снятие и постановка на охрану будут происходить при приближении/удалении ключа зажигания, а управление функциями автозапуска и снятие показаний будут производиться по зашифрованному каналу через Интернет. Таким образом, для угона авто злоумышленнику придется красть ключ зажигания или дублировать его, что проблематично, ведь автовладелец не оставит ключ без присмотра.

Библиографический список

1. Количество автомобилей в мире перевалило за миллиард. – URL: http://www.zr.ru/content/news/350201-kolichestvo_avtomobilej_v_mire_perevalilo_za_milliard/ (дата обращения: 26.03.2018).
2. Стандартизация оборудования в области радиосвязи. // Мир знаний. – URL: <http://mirznanii.com/a/120611/standartizatsiya-oborudovaniya-v-oblasti-radiosvyazi> (дата обращения: 12.03.2018).
3. Автосигнализация и её основные технические параметры // Хоттабыч-авто. – URL: <https://www.hottabych-auto.ru/articles/234/> (дата обращения: 19.03.2018).
4. Keeloq и двойной динамический код vs кодграббер // УГО-НА.НЕТ. – URL: <https://www.ugona.net/article9.html> (дата обращения: 02.04.2018).
5. Keeloq // Википедия. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Keeloq> (дата обращения: 09.04.2018).
6. Атака посредника // Википедия. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Атака_посредника (дата обращения: 12.03.2018).
7. Атака повторного воспроизведения // Википедия. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Атака_повторного_воспроизведения#Атака_отражением (дата обращения: 12.03.2018).
8. Защита радиоканала автосигнализаций // АвтоДела. – URL: <http://catalog.autodela.ru/article/view/2851> (дата обращения: 19.03.2018).

Сведения об авторах

Осипов Никита Романович – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КОБ-13-1с, г. Пермь, e-mail: nickit.osipow2013@yandex.ru.

Каменских Антон Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: kamenskikh.anton@gmail.com.

П.Е. Пьянков, А.Н. Каменских

МЕТОДИКА ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ СОЦИАЛЬНЫМ ИНЖЕНЕРАМ

В данной статье рассмотрена уязвимость корпоративных сетей под воздействием информационных атак при использовании методов социальной инженерии, а также приведены рекомендации для предотвращения реализации угроз.

Ключевые слова: информационная безопасность, социальная инженерия, уязвимость, персонал, социальный инженер, специалист по информационной безопасности.

P.E. Pyankov, A.N. Kamenskih

TECHNIQUE OF COUNTERACTION TO SOCIAL ENGINEERS

In this article, vulnerability of corporate networks because of the information attacks when using methods of social engineering is considered and recommendations for prevention of realization of threats had provided.

Keywords: information security, social engineering, vulnerability, personnel, social engineer, expert in information security.

На сегодняшний день информация во всех ее проявлениях является главным активом организаций и предприятий различных уровней. Злоумышленники действуют, желая помешать законной деятельности организации или получить личную прибыль. Основной задачей всегда остаётся проникновение внутрь периметра защиты. Для достижения состояния защищенности в информационной сфере компании принимают на вооружение технические способы защиты информации. Но мало устанавливать программные и программно-аппаратные средства защиты. Технологии обеспечения безопасности, которыми мы привыкли пользоваться в эпоху развитого Интернета, такие как межсетевые экраны, устройства идентификации, средства шифрования и другие, малоэффективны против методов социальной инженерии. Человек является самым слабым звеном из всех рубежей обороны. Необходимо постоянно проводить работу с персоналом, обучение и повышение квалификации в области противодействия методам социальной инженерии для обеспечения комплексной защиты и соответствия политики безопасности.

Безопасность – слишком часто просто иллюзия. В конце концов атаки социальных инженеров успешны, когда люди глупы или, гораздо чаще, просто не осведомлены о хороших мерах безопасности. Многие профессионалы в информационных технологиях придерживаются неправильных представлений, будто они сделали свои компании в значительной степени неуязвимыми к атакам, потому что они используют стандартные продукты по безопасности: файрволлы, системы для обнаружения вторжений или серьёзные устройства для аутентификации, такие как биометрические смарт-карты. Любой, кто думает, что одни только эти продукты по безопасности предоставляют достаточную защиту, соглашается на иллюзию защиты. Как заметил консультант по безопасности Брюс Шнайер: «Безопасность – это не продукт, это процесс». Кроме того, безопасность – это не технологическая проблема, это проблема людей и управления [1]. Пока разработчики непрерывно изобретают всё лучшие и лучшие технологии защиты, делая всё более трудным возможность использовать технические уязвимости, атакующие всё чаще используют человеческий фактор [1].

Распределенные системы подвергаются удаленным атакам, так как имеют для связи со своими компонентами открытые каналы передачи данных. Злоумышленник может пассивно отслеживать такой канал связи, а также подвергать его активной модификации.

Безопасность локальной вычислительной сети отличается от межсетевого взаимодействия тем, что на первое место выходят нарушения, совершаемые зарегистрированными пользователями, т.е. сотрудниками организации. Их работа с информацией во многих аспектах может быть санкционирована, в связи с чем выявить преступную деятельность зачастую сложно. Но именно на зарегистрированных пользователей, а также контрагентов ориентированы социальные инженеры.

Анализ самых распространенных угроз показывает, что источники угроз для корпоративных сетей могут варьироваться от неавторизованных вмешательств в работу со стороны злоумышленника до компьютерных вирусов. При этом весьма существенной причиной существования угроз являются человеческие ошибки. Наиболее частыми «дорогими» являются непреднамеренные ошибки пользователей, операторов и системных администраторов, взаимодействующих с корпоративной сетью. Такие ошибки могут нести прямой ущерб деятельности компании в виде ошибочных данных или неверного

взаимодействия, или же создавать новые уязвимости в работе корпоративной информационной сети.

Основные носители информации – это люди. Каждый человек представляет собой уникальный набор определённых качеств, который для каждого индивидуален. У всех есть свои слабости и предрасудки, комплексы и привычки, которые можно использовать. Того, кто использует уязвимости людей для достижения собственных целей, называют социальным инженером. Такой специалист должен совмещать в себе качества социолога и инженера. В качестве социолога он должен распознавать и анализировать различные социальные явления и процессы, использовать их принципы для достижения аналитических результатов. Как инженер он обязан обладать специфическим стилем мышления, что включает в себя изобретательность, умение проводить инженерный анализ, умение принимать решение на основе результатов для достижения поставленных целей.

Защититься от деятельности социальной инженерии, направленной против вас, можно, лишь владея информацией об их методах работы. Прежде всего о методах работы социальных инженеров стоит знать программистам, системным и сетевым администраторам, специалистам по компьютерной безопасности. Хотя бы потому, что именно они будут в первую очередь ответственны за кражу информации с компьютеров.

Построение системы защиты информационных систем должно основываться на следующих принципах:

- системность подхода;
- комплексность решений;
- разумная достаточность средств защиты;
- разумная избыточность средств защиты;
- гибкость управления и применения;
- масштабируемость;
- простота применения средств защиты;
- многорубежность средств защиты;
- отсутствие противоречий между средствами защиты.

Модель информационной защиты от методов социальной инженерии будет включать в себя применение технических мер, организационных и правовых. Применение технических мер защиты необходимо для реализации комплексности защиты корпоративной сети.

Технические меры позволяют реализовать такие аспекты информационной безопасности, как:

- разграничение доступа сотрудников;
- минимизация полномочий при принятии решений;
- мониторинг событий;
- антивирусный контроль;
- межсетевое экранирование;
- криптографическая защита и т.д.

Методика работы с персоналом.

Цель: мотивировать всех сотрудников организации к защите информации. Приучить использовать знания для защиты и объяснить невозможность исключения информационных атак.

1. Тренинг персонала не может быть общим для всех и должен формироваться по группам в зависимости от делопроизводства (например, менеджеры, ИТ-сотрудники, рядовые пользователи и т.д.).

2. Иметь план действий на случай внезапной атаки. Четко отработанный план позволяет минимизировать потери в кратчайшие сроки.

3. Анализировать примеры последнего применения социальной инженерии на других предприятиях. Такие примеры вводят в курс, позволяют проводить параллели и обучают одновременно.

4. Новые сотрудники должны проходить первоначальное ознакомление с новым местом работы и ответственностью за безопасность корпоративной сети.

5. Необходимы периодичность тренинга в связи с разработкой новой информации и повторение уже известного материала.

6. В качестве меры сохранения постоянной бдительности сотрудников применять внеплановые проверки, тестинг и аудит компании.

7. Повышение квалификации должно сопровождаться прохождением тренинга по работе с информацией большей секретности.

8. Идентификация личности при любых взаимодействиях с корпоративной сетью.

9. Авторизация пользователя путем проверки соответствующей дополнительной информации. Соответствие уровня доступа.

10. Периодическая проверка оборудования компании на предмет зараженности вредоносным ПО и защищенности от различного вида угроз.

11. Соблюдение уникальности логинов и паролей для корпоративной сети. Важно разъяснить сотрудникам, что пароли являются собственностью компании и не могут быть применены где-либо еще.

12. Необходимость наличия и выполнение единственно-правильного алгоритма в ситуациях раскрытия конфиденциальной информации по телефону при соответствующей аутентификации.

13. Создание системы учета действий всех сотрудников и оповещения об угрозах утечки информации.

Для повышения информационной безопасности корпоративной сети нужно уметь определять факт атаки на информационную сеть, при этом необходимо знать место атаки и наиболее востребованные уязвимости. Знание методов социальных инженеров напрямую определяет вероятность реализации угрозы.

Применение технических решений совместно с методиками работы с персоналом позволит повысить защищенность корпоративной сети от информационных атак с использованием методов социальной инженерии.

Библиографический список

1. Кевин Д. Митник, Саймон Вильям Л. Искусство обмана. – М.: Компания АйТи, 2004. – 360 с.

2. Анализ угроз сетевой безопасности [Электронный ресурс]. – URL: <http://ypn.ru/138/analysis-of-threats-to-network-security/>

3. Краткое введение в социальную инженерию [Электронный ресурс]. – URL: <https://habrahabr.ru/post/83415/>

Сведения об авторах

Пьянков Павел Евгеньевич – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КЗИ-17-1м., г. Пермь, г. Пермь, e-mail: monyarb@yandex.ru.

Каменских Антон Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: antoshkinoinfo@yandex.ru.

П.В. Репп

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ КИБЕР-АТАК

Статья посвящена актуальной проблеме моделирования кибер-атак в рамках создания систем диагностики безопасности промышленных информационных сетей. Производится анализ структуры кибер-атаки: описан жизненный цикл, приведена используемая для систематизации имеющихся технических методов атак метрика, дано определение сигнатуры. Представлены основные типы уязвимостей. Перечислены основные протоколы ЛВС в соответствии с уровнями модели OSI и их уязвимости. В результате получена структура уязвимостей основных протоколов ЛВС.

Ключевые слова: вычислительная сеть, кибер-атака, уязвимость, жизненный цикл, протокол, модель OSI.

P.V. Repp

THEORETICAL ASPECTS OF CYBER-ATAK MODELING

The article is devoted to the actual problem of cyber-attacks' modeling within diagnostic and assessment of industrial network security expert system design. The structure of the cyber-attack is analyzed: the life cycle is described, the metric used to systematize the available technical methods of attacks is given, the signature is defined. The main types of vulnerabilities are presented. The main LAN protocols are listed according to the levels of the OSI model and their vulnerability. As the result, the vulnerability structure of the main LAN protocols was obtained.

Keywords: network, cyber-attack, vulnerability, protocol, live cycle, OSI model.

Данная работа посвящена анализу теоретических аспектов моделирования кибер-атак с целью создания системы диагностики уязвимостей. Основой для выполнения работы послужили предыдущие результаты в области безопасности ЛВС, отраженные в [1–4] и определившие необходимость дальнейших исследований.

Проблема выявления уязвимостей основных протоколов промышленных локальных вычислительных сетей (ЛВС) является наиболее актуальной в настоящее время. В результате анализа было выяснено, что существуют семь основных видов уязвимостей: веб-ориентированные уязвимости, выполнение произвольного кода, отказ в обслуживании, обход ограничений безопасности, доступ конфиден-

циальной информации, эскалация привилегий, доступ к файловой системе, спуфинг [5].

Актуальность разработки системы диагностики уязвимостей обусловлена необходимостью создания адаптивной сетевой системы защиты от кибер-атак, динамически эволюционирующей при изменении условий работы [6]. Такая система диагностики должна включать блок генерации кибер-атак (БГКА). Для построения БГКА необходимо четкое понимание структуры кибер-атаки, классификация которой ориентирована на отдельные аспекты ее моделирования. Такими аспектами являются формализмы представления данных и знаний об атаках, уровни моделей OSI (Open Systems Interconnection Basic Reference Model) или DoD (Department of Defense), типы атак, возможности масштабирования, способность учитывать динамические характеристики атак (время, параллельные процессы, цепочки взаимосвязанных инцидентов) и др. Основные типы моделей атак – табличные, матричные и логические модели, модели, основанные на графах и использующие объектно-ориентированный подход [7].

При построении математической модели кибер-атаки задачами являются: описание жизненного процесса кибер-атаки, определение используемых для проведения кибер-атаки методов, выявление сигнатур кибер-атак. Как и любой процесс, кибер-атака характеризуется определенной последовательностью этапов, называемых жизненным циклом. Существует специальный термин «убийственная цепочка» (Kill Chain) [8], включающая семь стадий:

1. Разведка: исследование, идентификация и выбор жертвы, часто используя публичные источники данных (социальные сети, сайты конференций и др.).

2. Вооружение: оснащение вредоносным содержанием файла/контента (PDF, MS Office), который должен быть прочтен/открыт жертвой.

3. Доставка: донесение вредоносного контента до жертвы, чаще всего с использованием e-mail, веб-сайтов или USB флеш-карты.

4. Заражение: запуск вредоносного кода, используя имеющиеся на целевом компьютере уязвимости, с последующим его заражением.

5. Инсталляция: открытие удаленного доступа для незаметного управления и обновления вредоносного кода (чаще всего используется протокол DNS).

6. Получение управления. Получение обновлений с новым функционалом извне, а также управляющих команд для достижения поставленных целей.

7. Выполнение действий: сбор и кража данных, шифрование файлов, перехват управления, подмена данных и решение нарушителем других задач.

В общем случае Kill Chain представляет систематический процесс достижения нарушителем цели для получения желаемого эффекта. Понятие Kill Chain используется как при моделировании угроз, так и при оценке эффективности Security Operation Center (SOC). Распределение обнаруженных и нейтрализованных атак по их стадии – это одна из метрик SOC.

При моделировании угроз все этапы «цепочки» заполняются определенными действиями. Для систематизации имеющейся информации всех методов атак, используемых злоумышленниками, можно использовать матрицу ATT&CK (Adversarial Tactics, Techniques & Common Knowledge), разработанную американской корпорацией MITRE. Данная компания имеет свою версию Kill Chain, состоящую так же из семи этапов: разведка (Recon), вооружение (Weaponize), доставка (Deliver), эксплуатация (exploit), контроль (Control), исполнение (Execute), поддержка (Maintain), причем с 2018 года три последних стадии атаки предлагается делить на десять отдельных тактик, используемых злоумышленниками. В свою очередь, эти десять тактик расписываются на 219 технических методов нападения [9].

Кроме того, при моделировании кибер-атак необходимо учитывать ее характерные признаки, например, необоснованное агрессивное обращение к какому-либо сетевому порту. Такие признаки носят название сигнатур. Идеальная сигнатура полностью определяет атаку и при этом отличается максимальной простотой. Разные виды атак характеризуются различными видами сигнатур [10]. Так, технология обнаружения атак путем идентификации аномального поведения основана на гипотезе, что при попытке вторжения появляется отклонение от нормальной деятельности пользователей или взаимодействия узлов сети. Примером аномального поведения могут служить большое количество соединений за короткий промежуток времени, высокая загрузка центрального процессора рабочей станции и т.д. Большинство сигнатур было создано путем многократного выполнения известного программного кода атаки с контролем сопутствующих ему данных в сети и поиском в них уникальной последовательности двоичных кодов, повторяющихся при каждом выполнении [11].

Анализируя технические методы нападения, можно сделать вывод, что большинство атак совершается при использовании уязвимо-

стей основных протоколов ЛВС. Наиболее распространенной системой классификации сетевых протоколов является упомянутая модель OSI. Таким образом, для построения четкой структуры кибератаки, необходимо проанализировать уязвимости отдельных протоколов и выявить наиболее уязвимые уровни модели OSI.

Базовая модель OSI является основой для множества сетевых протоколов и определяет правила сетевого взаимодействия [12] на семи уровнях: уровне приложений (Application level), уровне представлений (Presentation level), сеансовом уровне (Session level), транспортном уровне (Transport level), сетевом уровне (Network level), канальном уровне (Data link level), физическом уровне (Physical level). Все уровни объединены в три макроуровня: протокол уровня приложений, протокол коммуникационного уровня, физическая топология.

Остановимся на уровне приложений как самом близком к пользователю. Этот уровень не предоставляет услуги другим уровням модели OSI, но обеспечивает поддержку прикладных процессов и программ конечного пользователя и управление взаимодействием этих программ с сетью передачи данных [13]. Анализ показал, что основными протоколами и их уязвимостями на этом уровне являются:

- HTTP (HyperText Transfer Protocol) – передачи данных (изначально в виде гипертекстовых документов в формате «HTML», в настоящий момент используется для передачи произвольных данных). Основой HTTP является технология «клиент-сервер». Имеющиеся уязвимости могут позволить злоумышленнику осуществить DoS-атаку или выполнить произвольный код на системе.

- Telnet (Teletype Network) – это средство связи, которое устанавливает транспортное соединение между терминальными устройствами, клиентами и сервером и поддерживающий этот стандарт соединения. Реализует текстовый интерфейс. Имеются уязвимости, позволяющие провести DoS-атаку и подключиться к созданной telnet-сессии с последующей возможностью исполнения любого потенциально опасного кода.

- SMTP (Simple Mail Transfer Protocol) – протокол, предназначенный для передачи электронной почты в сетях TCP/IP. С помощью протокола SMTP почта рассылается без какой-либо шифровки и не прикрепляется к конкретному адресу, что делает очень простым ее перехват, изменение и замену адреса/имени отправителя. Обнаруженные уязвимости позволяют удаленному пользователю вызвать отказ в обслуживании и получить доступ к важным данным.

– FTP (File Transfer Protocol) – обеспечивает передачу файлов между любыми рабочими станциями, на которых действует. Обеспечивает доступ ко всем каталогам и файлам и выполняет некоторые операции с каталогами, например их перемещение [16]. Уязвимость протокола может эксплуатироваться злонамеренными FTP-серверами и позволяет серверу перезаписывать или создавать произвольные файлы вне рабочего каталога клиента [19]. Также можно обойти защиту, выбрав имя пользователя «anonymous» (аноним).

– DNS (Domain Main Name) – компьютерная распределённая система для получения информации о доменах. Основой является представление об иерархической структуре доменного имени и зонах [20]. Уязвимость протокола заключается в том, что DNS-сервер использует предсказуемый номер порта для отправки DNS-запросов. Злоумышленник может угадать номер порта, который используется для отправки данных, и с помощью специально сформированного ложного DNS-ответа подменить данные в кэше DNS-сервера.

Данные анализа уязвимостей основных протоколов на уровне приложений приведены в таблице.

Структура уязвимостей основных протоколов уровня приложений

Уровни	Описание	Протокол	Уязвимость
Приложений	Связь процессов приложений с сетевыми процессами	Telnet	Обход ограничений безопасности, доступ к конфиденциальной информации, эскалация привилегий
		SMTP	Выполнение произвольного кода
		FTP	Доступ к файловой системе, доступ к конфиденциальной информации
		DNS	Обход ограничений безопасности, доступ к конфиденциальной информации, спуфинг

Разработанная структура действия кибер-атак на всех уровнях модели OSI послужит основой для разработки генератора кибер-атак на основе нейронной сети.

Библиографический список

1. Репп П.В. Разработка экспертной системы оценки безопасности промышленной информационной сети // Инновационные технологии нового тысячелетия: сб. ст междунар. науч.-практ. конф.: в 2 ч. (25 сентября 2016 г., г. Пермь). Ч. 1. – Уфа: АЭТЕРНА, 2016. – С. 107–113.
2. Репп П.В. Проблемы моделирования системы диагностики безопасности промышленных сетей // Инжиниринг и телекоммуникации –

En&T-2016: материалы Третьей Междунар. конф. (29–30 ноября 2016 г., г. Москва) / Москов. физико-техн. ин-т. – URL: <http://www.ent.info/articles/ent2016-agenda-ru.pdf>

3. Pepp P.V. System of industrial safety information network technical diagnostics// Journal of Physics: Conference Series (JPCS) – London: IOP Publishing. – 2016. – № 803. – 6 p. – URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/803/1/012127>

4. Polina Repp. Diagnostic and Assessment of Industrial Network Security Expert System. – 6 p. – URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8076474/>

5. Лукацкий А.В. Методы современных киберпреступников. Блог Cisco в России и СНГ. – URL: <https://gblogs.cisco.com.ru/anatomyofhack/>

6. Котенко Д.И., Котенко И.В., Саенко И.Б. Методы и средства моделирования атак в больших компьютерных сетях: состояние проблемы // Труды СПИИРАН. – 2012. – Вып. 3(22). – С. 5–30.

7. Сердюк В. А. Организация и технологии защиты информации: обнаружение и предотвращение информационных атак в автоматизированных системах предприятий. – М.: Изд-во НИУ ВШЭ, 2011.

8. Лукацкий А.В. Убийственная цепочка и что такое Kill Chain. Блог: Бизнес без опасности. – URL: <http://lukatsky.blogspot.ru/2016/10/kill-chain.html>

9. ATT&CK Matrix for Enterprise // Adversarial Tactics, Techniques & Common Knowledge. – URL: https://attack.mitre.org/wiki/Main_Page

10. Защита от хакеров корпоративных сетей / Ф.У. Линч [и др.]. – М.: Компания АйТи: ДМК-Пресс, 2005. – 864 с.

11. Шаньгин В.Ф. Информационная безопасность и защита информации. – М.: ДМК-Пресс, 2017. – 702 с.

12. Лэмпл Т., Портер Д., Челлис Дж. CCNA: Cisco Certified Network Associate: учеб. руководство. – М.: Лори, 2001.

13. Программа сетевой академии Cisco CCNA 3 и 4: вспомогательное руководство. – М.: Вильямс, 2007. – 994 с.

Сведения об авторе

Репп Полина Викторовна – аспирантка кафедры «Информационные технологии и автоматизированные системы» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: polina.repp@gmail.ru.

А.В. Садилов, С.В. Гонтовой

**О ПРОБЛЕМАХ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ,
СВЯЗАННЫХ С УСТРАНЕНИЕМ УЯЗВИМОСТЕЙ
MELTDOWN И SPECTRE**

В данной статье приводятся описание уязвимостей Meltdown и Spectre, обзор их влияния на производителей процессоров и их потребителей, а также на информационную безопасность в целом. Целью статьи являются обобщение разрозненных данных и исключение ложных представлений об этих уязвимостях, выработка мер противодействия им.

Ключевые слова: Meltdown, Spectre, информационная безопасность, спекулятивное выполнение, уязвимости ИБ.

A.V. Sadilov, S.V. Gontovoy

**ABOUT THE PROBLEMS OF INFORMATION
SECURITYRELATED TO ELIMINATION OF MELTDOWN
AND SPECTRE VULNERABILITIES**

This article describes the Meltdown and Specter vulnerabilities, a review of their impact on processor manufacturers and their consumers, as well as on information security in general. The purpose of the article is to generalize the disparate data, to exclude false ideas about these vulnerabilities, to develop measures to counteract them.

Keywords: Meltdown, Spectre, information security, speculative execution, vulnerabilities of information security.

3 января 2018 года группа исследователей опубликовала информацию об уязвимостях Meltdown и Spectre, что сразу вызвало интерес как общественности, так и профессионалов в области информационной безопасности. Появилось множество статей и мнений отдельных специалистов с разной степенью погружения в проблему и ошибочности полученных выводов. Данная статья призвана должным образом систематизировать имеющиеся разрозненные данные по этим уязвимостям, осветить возникающие при их возможном эксплуатировании проблемы информационной безопасности и последствия для крупных игроков на рынке информационных технологий, а также попытаться определить, что сейчас необходимо делать отдельным

специалистам и чем придется пожертвовать для обеспечения приемлемого уровня безопасности.

Принцип реализации атак. Meltdown и Spectre схожи, так как обе в своей основе имеют уязвимость, базирующуюся на аппаратных недостатках любого современного компьютера. Базовая информационная безопасность отдельной рабочей станции достигается за счет обеспечения полной изоляции выполняющихся на ней программ и невозможности влияния на данные друг друга, если только не имела место ошибка или заранее предоставленная привилегия. Каждой программе выделено виртуальное адресное пространство, а оно, в свою очередь, отображается на реальную физическую память так, что пространства разных программ не пересекаются, контроль за этим выполняется аппаратным средством Memory Management Unit (MMU). Это же средство обеспечивает правильное функционирование системы управления доступом к различным участкам памяти с разными привилегиями.

Система, основанная на таких принципах, является простой и одновременно надежной. Но такая идиллия безопасности не может существовать в условиях постоянной и стремительной модификации устройств. Ранее каждый процессор при вычислениях следовал строгой последовательности действий, но двадцать лет назад стали появляться процессоры, которые старались предугадывать результат обрабатываемой операции на основе данных о своей предыдущей работе, а не запрашивать каждый раз данные из сравнительно медленной оперативной памяти и производить вычисления, что позволяло существенно повысить их производительность. Если же «предсказание» в корне неверно или не удовлетворяет каким-либо параметрам, то текущий ход конвейера процессора сбрасывается, и кусочек кода начинает вычисляться сначала. Данная функция позволяет существенно повысить производительность процессора. Но ее неучтенные при проектировании возможности нарушают описанные выше принципы обеспечения конфиденциальности.

Сущность уязвимости заключается в том, что проверка удовлетворения кода высокоуровневым параметрам производится не сразу и на нее требуется определенное время. Сюда относится и проверка модулем MMU.

Что это дает на практике? Возьмём для примера фрагмент кода:

```
if (X < array1_size) do( y = array2[array1[X]]), (1)
```

Если много раз повторять фрагмент кода (1) и первое условие всегда будет верным, то процессор всегда будет предполагать, что в последующих обращениях оно также с высокой вероятностью будет истинным. Но что будет, если окажется, что переменная X находится за пределами доступной программе памяти? Второе выражение так или иначе будет выполнено. Следовательно, если программа обратится к участку памяти, на доступ к которому она не имеет прав, то код будет выполнен, затем сброшен после проверки MMU, а его следы будут вычищены отовсюду, кроме кэша. В кэш помещаются любые операции, проходящие через процессор, независимо от того, были они выполнены или нет. Но программы не могут получать информацию из кэша напрямую. И далее инструменты работы и «выживания» данных из него разнятся. Для Meltdown это определение искомого адреса X по скорости ответа процессора (для X время будет затрачено гораздо меньшее время) и последующее вычисление значения по этому адресу с помощью процедур косвенной адресации, что относительно легко реализовать злоумышленнику, но и так же легко оказалось закрыть оперативными программными патчами.

Реализация Spectre идет иным путем и в общем случае подразумевает использование какой-либо легитимно работающей программы для получения скрытых данных. Тогда программа злоумышленника будет использовать процедуры, которые наиболее часто встречаются в атакуемом процессе, а сама суть взлома останется той же: обмануть блок MMU, добиться добавления защищаемой информации в кэш и исследовать кэш сторонними методами или даже инструментами самой легитимной программы. Несмотря на схожий способ получения доступа к информации, данная уязвимость намного более опасна, так как имеет в своей основе несколько иной принцип и может быть эксплуатирована большим количеством еще невыявленных способов.

И Meltdown, и Spectre подвержены почти все процессоры, выпущенные за последние двадцать лет, кроме микроконтроллеров. Уязвимыми также оказались их мобильные версии, используемые в планшетах, смартфонах и т.п. При этом полноценного способа защиты от них до сих пор не имеется. Все эти аспекты делают данный прецедент одним из крупнейших за всю историю информационной безопасности.

Проблемы ИБ. С точки зрения информационной безопасности данные уязвимости имеют довольно узкую область применения.

В общем случае они позволяют просматривать всю информацию, физически хранящуюся на компьютере, вне зависимости от привилегий, которые обычно требуются для доступа к ней. При этом больше на информацию никак влиять нельзя, а пытаться просматривать все искомые данные подобным образом неэффективно, так как это достаточно медленно и сильно зависит от производительности взламываемого устройства. С точки зрения злоумышленника, гораздо более целесообразно найти хранящиеся в системе пароли, ключи шифрования и прочие идентификаторы и уже потом использовать их для реализации прямого доступа в систему.

При этом отследить программу, эксплуатирующую данные уязвимости, как правило, не представляется возможным. С точки зрения сканеров безопасности она абсолютно безвредна, не имеет высокого приоритета, не пытается получить его и практически не оставляет следов в системе, а во время принятия решения о блокировке велик шанс ложного срабатывания.

В сухом остатке Meltdown и Spectre – это уязвимости, позволяющие злоумышленнику нарушить конфиденциальность информации, физически хранящейся на данном устройстве. Они могут быть эксплуатированы либо при физическом доступе злоумышленника к устройству, либо удаленно при запуске пользователем exe-файла из неизвестных источников или исполнении файла JavaScript в браузере.

Последствия. Обнаружение и обнародование данных уязвимостей нанесло весомый удар по всем компаниям, так или иначе относящимся к сфере ИТ или эксплуатирующим большое количество вычислительных мощностей для своей деятельности.

В случае компаний-производителей процессоров это, в первую очередь, удар по репутации. Особенно это касается Intel, чьи процессоры занимают большую часть рынка и в то же время полностью подвержены всем вышеназванным уязвимостям. Архитектуры же AMD, как утверждают представители компаний, не подвержены Meltdown и теоретически подвержены Spectre, однако успешно реализовать использование данной уязвимости на них до настоящего времени не получилось. Тем не менее всем компаниям пришлось в срочном порядке создавать программные патчи, создавать особые подразделения для выявления новых уязвимостей в этой области и выделять ресурсы для аппаратного их устранения в будущих моделях процессоров, что также вызывает определенные финансовые издержки.

Все компании, так или иначе относящиеся к разработке и поддержке операционных систем, тоже не остались в стороне: сотрудничая с производителями процессоров, они были вынуждены экстренно создавать патчи для противодействия Meltdown и искать пути для разрешения ситуации со Spectre.

Самый большой потенциальный ущерб понесли компании, занимающиеся облачными, научными вычислениями, работающие с BigData, и прочие организации, зависящие от объемов вычислительных мощностей, так как программные патчи замедляют спекулятивное выполнение, что в отдельных программах может снизить производительность до 30 %. Таким образом, имеющийся массив оборудования станет менее производительным, и для поддержания мощностей придется покупать новые, еще не исправленные процессоры. Более того, это оборудование остается уязвимым к малоизученному Spectre, и в том случае, если злоумышленники научатся эксплуатировать подобную уязвимость, именно крупные вычислительные центры станут их первой мишенью для отработки атак.

Наконец, менее зависящие от производительности отдельных процессоров организации и отдельные пользователи тоже оказываются под угрозой. В таких условиях невозможно в полной мере ни обеспечить безопасность критически важных объектов, ни защитить государственную или коммерческую тайну, ни даже доверить обработке компьютера данные своей банковской карты: все эти данные могут быть скомпрометированы в случае успешной эксплуатации уязвимостей злоумышленниками.

Так что же все-таки делать? Данный вопрос закономерно возникает у каждого, кто подробно ознакомится с данной проблемой. Со стороны обычного пользователя не требуется практически никаких действий, достаточно не отключать автоматические обновления операционной системы и программного обеспечения и периодически обновлять используемые устройства.

Гораздо более остро эта проблема стоит перед специалистами информационной безопасности разного уровня. Причина в том, что уязвимости носят массовый характер и имеются во всех представленных на рынке устройствах, а достаточно изящных решений нет и в ближайшее время не предвидится. Тем не менее организация защиты все равно необходима. Поэтому попробуем разработать общий план действий для специалиста ИБ.

В первую очередь необходимо организовать информационное обеспечение по данной проблеме. Своевременное получение новостей о выходе критических патчей, новых продуктов или первых случаев реального взлома может сыграть существенную роль в обеспечении безопасности.

Далее необходимо вынести решения по принятию или уменьшению риска утечки информации, финансовом обеспечении для восстановления утерянных вычислительных мощностей и постепенном обновлении аппаратной базы после выхода исправленных устройств, а также о различных дополнительных мерах.

Можно, например, временно ужесточить политики организации по работе с неучтенными носителями, по использованию сотрудниками ресурсов Интернета, а также предпринять другие дополнительные действия, исходя из специфики конкретной организации.

Заключение. Обнаружение и обнародование данных уязвимостей, безусловно, оказали сильное влияние на мировую индустрию информационных технологий. Многие специалисты ИБ еще раз убедились, что нельзя быть уверенным на 100 % в защищенности ни одной из частей системы.

В данный момент весь мир подвешен в состоянии неопределенности: все вокруг знают, что их устройства уязвимы, однако никто не знает ни как полноценно защититься от этих уязвимостей, ни даже примерных дат, когда произойдут подвижки в этой области.

Остается лишь надеяться, что комплексных мер безопасности окажется достаточно для противодействия данным уязвимостям или что у потенциальных злоумышленников не хватит знаний и средств, чтобы вовремя воспользоваться Meltdown и Spectre, так как они очень сложны в реализации. В противном случае информационная безопасность может получить невиданный ранее по критичности прецедент.

Библиографический список

1. Meltdown [Электронный ресурс] / Moritz Lipp, Michael Schwarz, Daniel Gruss [и др.]. – URL: <https://meltdownattack.com/meltdown.pdf> (дата обращения: 26.04.2018).

2. Spectre Attacks: Exploiting Speculative Execution [Электронный ресурс] / Paul Kocher, Daniel Genkin, Daniel Gruss [и др.]. – URL: <https://spectreattack.com/spectre.pdf> (дата обращения: 26.04.2018).

3. Артамонов О. Новогодние подарки, часть первая: Meltdown [Электронный ресурс]. – URL: <https://geektimes.com/post/297029/> (дата обращения: 26.04.2018).

4. Артамонов О. Новогодние подарки, часть вторая: Spectre [Электронный ресурс]. – URL: <https://geektimes.com/post/297031/> (дата обращения: 26.04.2018).

5. Разбираемся с Meltdown и Spectre: что нужно знать о новых уязвимостях, которые обнаружены практически во всех CPU [Электронный ресурс]. – URL: <https://habr.com/company/uahosting/blog/347254/> (дата обращения: 26.04.2018).

6. «Без Meltdown и Spectre»: Intel перепроектирует свои процессоры [Электронный ресурс]. – URL: <https://habr.com/company/1cloud/blog/352244/> (дата обращения: 26.04.2018).

7. Как уязвимости Meltdown и Spectre влияют на ваш смартфон [Электронный ресурс]. – URL: <https://geektimes.com/company/pochtoy/blog/297081/> (дата обращения: 26.04.2018).

Сведения об авторах

Садиков Андрей Вячеславович – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КЗИ-14-1б, г. Пермь, e-mail: sadik.andrei@yandex.ru.

Гонтовой Семен Викторович – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КЗИ-14-1б, г. Пермь, e-mail: gontovoyS@yandex.ru.

А.С. Сорокин, А.С. Шабуров

АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ПРИ РЕШЕНИИ ПРОБЛЕМЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ АТАК

В данной статье проводится анализ сравнения разработанной последовательной искусственной нейронной сети и разработанной многослойной нейронной сети, а также их эффективности в предотвращении компьютерных атак.

Ключевые слова: искусственная нейронная сеть, персептрон, последовательная нейронная сеть, многослойная нейронная сеть, компьютерная атака, информационная безопасность.

A.S. Sorokin, A.S. Shaburov

ANALYSIS OF THE OPTIONS FOR THE CONSTRUCTION OF MODELS OF A NEURON NETWORK WHILE SOLVING THE PROBLEM OF PREVENTION COMPUTER ATTACKS

In this article analyzes of comparison between the developed sequential artificial neural network and the developed multilayer artificial neural network, as well as their effectiveness in preventing computer attacks.

Keywords: artificial neural network, perceptron, a consistent neural network, multilayer neural network, computer attack, Information Security.

В последнее время всё большую популярность приобретают искусственные нейронные сети (ИНС). Они развиваются и повсеместно внедряются во многие области науки, промышленности, а также жизни, даже в голосовых помощников. Способность нейронной сети к обучению по различным данным используют в моделировании сложных по прогнозированию поведения систем. Модели, основанные на искусственных нейронных сетях, имеют способность адаптироваться к динамическим условиям, к тому же они достаточно быстро функционируют. Эти особенности важны при работе системы защиты информации в реальном времени. Наиболее часто используют многослойные нейронные сети. Они могут моделировать функцию практически любой степени сложности. Выбор структуры нейронной сети осуществляется в соответствии со сложностью задачи, которую будет решать сеть.

Нейронные сети, в отличие от статистических методов многомерного классификационного анализа, базируются на параллельной обработке информации и обладают способностью к самообучению, т.е. получать обоснованный результат на основании данных, которые не встречались в процессе обучения. Эти свойства позволяют нейронным сетям решать сложные задачи, которые на сегодняшний день считаются трудноразрешимыми [1]. В информационной безопасности можно применить нейронные сети для того, чтобы классифицировать компьютерную атаку и одновременно выявить требования по предотвращению такой атаки.

Настоящая работа посвящена анализу вариантов построения моделей нейронной сети. Будут сравниваться две модели на основе ИНС по предотвращению компьютерных атак, различия которых заключается в том, что в одной из них будет использоваться многослойная нейронная сеть, а в другой – две однослойные нейронные сети, т.е. применяться будут сети с одним скрытым слоем. Задача обеих моделей заключается в оценивании данных [2] с последующим принятием решения. В первом случае две нейронные сети имеют один уровень анализа, т.е. одна из них анализирует информацию и выявляет атаку, а вторая – принимает решение по устранению. Во втором случае многослойная нейронная сеть включает в себя два уровня анализа, так как в первом скрытом слое она обнаруживает нарушение, во втором проводит анализ по определению атаки и подаёт на выход готовое решение по её ликвидации.

Возьмём модель нейронной сети как отдельную систему обнаружения атак, тогда она должна обрабатывать трафик и анализировать информацию на наличие в нем нарушений в системе. После чего предполагается, что любые замеченные случаи идентифицируются с указанием на атаку, и полученные данные отправляются к администратору безопасности или используются самой системой для автоматического реагирования. Такая система явно будет обладать свойством адаптивности.

Для того чтобы сравнивать две модели нейросетей по предотвращению компьютерных атак, нужно задать одинаковые параметры на вход и выход. Выходные данные нужны для обучения искусственной нейронной сети, таким образом она будет обучаться с учителем [3]. Полученные значения будут представлены в виде требований и методов предотвращения компьютерных атак. Получается, при

совершении злоумышленником атаки модель предоставит пользователю или системе информацию по устранению нарушения.

Для обнаружения компьютерных атак используют шаблоны поведения хакеров [4–5], методы на основе правил, описывающих сценарии атак, также выявляют деятельность, которая отличается от шаблонов, установленных для пользователей [6–8]. Если действия пользователя не совпадают с установленными правилами, тогда механизм обнаружения идентифицирует потенциальные атаки.

Во входные данные будут вводиться траектории функционирования защищаемой системы и взаимодействующих с ней внешних объектов, которые представлены в некотором числовом пространстве признаков. Таким образом, ИНС обучаются на примерах атак каждого класса, вслед за этим нейросети используются для распознавания принадлежности наблюдаемого поведения одному из классов атак. Такой метод называется «обнаружение злоупотреблений». Существует метод обнаружения аномалий, но для этого входными данными будет являться наблюдаемое поведение в нормальных условиях. По окончании обучения нейросеть будет работать в режиме распознавания, и выявлять атаку она будет вследствие изменения нормального поведения системы [9].

Рассматривая модель по предотвращению компьютерных атак на основе двух простых нейросетей, предполагается, что искусственная нейронная сеть А (рис. 1) на вход будет получать поток данных системы в нормальном состоянии с признаками атаки X_i , где i – количество признаков атак; а на выходе будем получать информацию по обнаружению этих атак Y_j , где j – количество обнаруженных атак. Затем совокупность сведений о найденных нарушениях используем в качестве входного вектора на искусственную нейронную сеть Б (рис. 2).

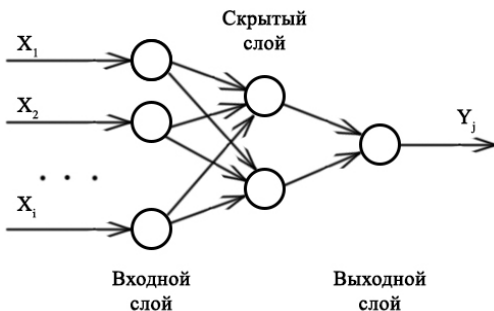


Рис. 1. Искусственная нейронная сеть А

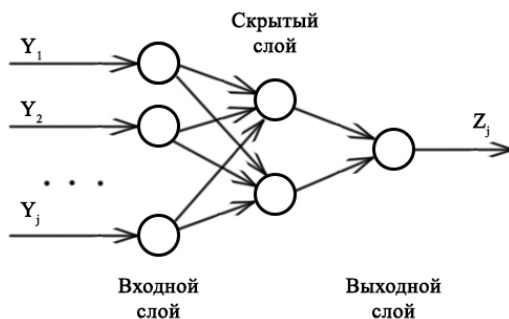


Рис. 2. Искусственная нейронная сеть Б

Эта нейросеть в качестве выходного вектора будет предоставлять требования и методы по предотвращению компьютерных атак Z_j , где j – количество требований и методов по ликвидации каждого найденного нарушения системы. В итоге, чтобы этого добиться, следует обучить обе нейронные сети, при этом входные данные в сетях должны быть связаны друг с другом. Обучение такой модели займёт немало времени.

Многослойная ИНС (рис. 3) включает в себя нейронные сети А и Б. У такой сети входным вектором является также нормальное поведение систем с различными признаками атаки X_i , но выходными данными уже будут требования и методы по предотвращению компьютерных атак Z_i .

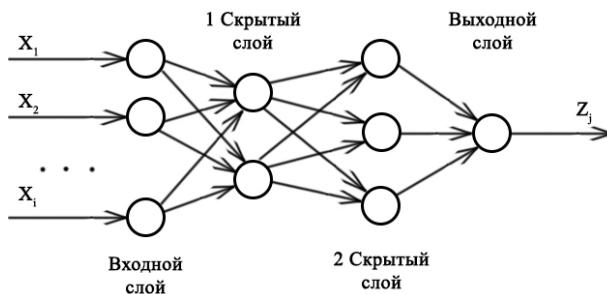


Рис. 3. Многослойная искусственная нейронная сеть

Первая стадия – обнаружение атаки будет выполнена в первом скрытом слое. Сигналы попадают к нейронам первого слоя, затем после их активации выходные сигналы передаются в следующий слой.

Эти же данные приходится входными параметрами для второго скрытого слоя. Далее этот принцип повторяется, сигналы проходят второй слой и достигают выхода. В этом случае обучение пройдет быстрее.

При сравнении рассмотренных моделей по предотвращению компьютерных атак на основе ИНС можно определить, какая сеть обучилась лучше, насколько они хорошо адаптировались под информационную систему, сколько времени было затрачено на обучение нейросетей. Главной характеристикой результата будет ошибка нахождения компьютерных атак, помимо этого не менее важным параметром является, насколько правильно были представлены требования и методы по предотвращению этих атак.

При сравнении двух моделей ведущим критерием будет коэффициент искажения [2], т.е. этот параметр будет определять, с какой ошибкой работает та или иная модель на основе нейронной сети. Определяться он будет на этапе тестирования, когда модель уже обучилась, где и происходит проверка правильности обучения путём загрузки в модель ИНС схожих данных. Вычисляется показатель искаженности отношением количества изменённых данных на выходе на количество всех данных на выходе. Если коэффициент не более 5 %, тогда модель пригодна для предотвращения компьютерных атак.

Данный анализ моделей построения позволит сравнить многослойную нейронную сеть и две последовательные ИНС в области информационной безопасности, а также выявить, с какой ошибкой они работают. Это позволит выявить, какую лучше использовать структуру для обеспечения лучшей защищенности, в данном случае от компьютерных атак.

Библиографический список

1. Абрагин А.В. Перспективы развития и применения нейронных сетей // Проблемы современной науки и образования. – 2015. – № 42. – 10 с.
2. Бондарев В.Ю., Сорокин А.С., Кротова Е.Л. Искусственная нейронная сеть как средство и метод статистической обработки данных // Вестник УрФО. Безопасность в информационной сфере. – 2016. – № 20. – С. 19–22.
3. Сорокин А.С., Бондарев В.Ю., Кротова Е.Л. Создание и обучение искусственной нейронной сети для статистического оценива-

ния данных // Вестник УрФО. Безопасность в информационной сфере. – 2016. – № 20. – С. 29–32.

4. Kumar S., Spafford E. A Pattern Matching Model for Misuse Intrusion Detection // Proc. of the 17th National Computer Security Conference. – 1994. – P. 11–21.

5. State of the Practice of Intrusion Detection Technologies / J. Allen, A. Christie, W. Fithen, J. McHugh, J. Pickel, E. Stoner; Carnegie Mellon University. Networked Systems Survivability Program. Technical Report CMU/SEI-99-TR-028 ESC-99-028. – 2000, January.

6. Helman P., Liepins G., Richards W. Foundations of Intrusion Detection // Proc. of the 15th Computer Security Foundations Workshop. – 1992. – P. 114–120.

7. Ryan J., Lin M., Miikkulainen R. Intrusion Detection with Neural Networks. AI Approaches to Fraud Detection and Risk Management: Papers from the 1997 AAAI Workshop (Providence, Rhode Island). – Menlo Park, CA: AAAI. – 1997. – P. 7–79.

8. Bace R. An Introduction to Intrusion Detection Assessment for System and Network Security Management. – 1999.

9. Гамаюнов Д.Ю. Обнаружение компьютерных атак на основе анализа поведения сетевых объектов: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук (05.13.11) / МГУ им. М.В. Ломоносова. – М., 2007. – 89 с.

Сведения об авторах

Сорокин Андрей Станиславович – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: sly-kyper@yandex.ru.

Шабуров Андрей Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: shans@at.pstu.ru.

П.Д. Субботина, Е.Л. Кротова

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ БЛОКЧЕЙН В ИНФРАСТРУКТУРЕ ОТКРЫТЫХ КЛЮЧЕЙ

В данной статье представлен анализ существующей технологии реализации инфраструктуры открытых ключей – удостоверяющие центры. Также сделан обзор новых подходов к реализации с применением технологии блокчейн: технология *Certcoin* и *KSI*.

Ключевые слова: инфраструктура открытого ключа, удостоверяющий центр, блокчейн, *Certcoin*, инфраструктура подписи без ключа.

P.D. Subbotina, E.L. Krotova

APPLICATION OF BLOKCHAIN TECHNOLOGY IN PKI

This article presents an analysis of existing technology for implementing the public key infrastructure – Certificate Authority. Also reviewed are new approaches to implementation with the use of blocking technology – *Certcoin* and *KSI*.

Keywords: PKI, Certificate Authority, blockchain, *Certcoin*, *KSI*.

Инфраструктура открытых ключей, *PKI* – набор средств (технических, материальных, человеческих и т.д.), распределённых служб и компонентов, в совокупности используемых для поддержки криптозадач на основе закрытого и открытого ключей [1]. В данной работе рассматривается основной подход реализации – централизованные, сторонние удостоверяющие центры (УЦ).

Удостоверяющий центр действует доверенной третьей стороной, которая отвечает за доставку и управление цифровыми сертификатами для сети пользователей. Для этого УЦ должен иметь процесс регистрации, в соответствии с которым удостоверяется личность пользователя, ей присваивается уникальное имя (например, *Google* или *Facebook*), и ее открытый ключ записывается вместе с ее уникальным именем. Эти записи содержат дату истечения срока действия, а также указание цели ключа: шифрование данных или проверка подписи. УЦ выполняет две цели: упрощает проверку того, что пользователь имеет определенный открытый ключ, и облегчает поиск открытых ключей, соответствующих пользователям [1].

Существует ряд угроз, которым подвержены УЦ. Слабые места математически надёжных схем защиты почти всегда связаны с челове-

ком. Многие цифровые сертификаты могут быть просрочены или содержать орфографические ошибки. Также имеются и внешние источники угроз. Злоумышленник может легко фальсифицировать личности пользователей и прослушивать зашифрованные каналы связи, получив доступ к УЦ. Исходя из того, что инфраструктура открытых ключей в данное время является достаточно распространённой, а существующие технологии не удовлетворяют всем необходимым требованиям безопасности, требуется создание альтернативного подхода к реализации.

Группа разработчиков из Массачусетского технологического института (МТИ, *Massachusetts Institute of Technology, MIT*) представила проект *Certcoin*. Это децентрализованная альтернативная инфраструктура открытого ключа, основанная на технологии блокчейн. Она предоставляет возможность публиковать открытый ключ, соответствующий данному идентификатору или домену надежным, постоянным способом. *Certcoin* – это жизнеспособная *PKI*, способная заменить УЦ. Такая конструкция имеет преимущества – полностью децентрализованная архитектура, отказоустойчивость, избыточность и прозрачность. Несмотря на это, *Certcoin* поддерживает ожидаемые функции полнофункционального УЦ, включая создание сертификатов, аннулирование, сцепление (формирование цепочки) и восстановление. Доменные покупки и переводы осуществляются с помощью простых транзакций *Bitcoin* для стимулирования майнеров [2].

Разработчики выявили проблему необходимости хранения каждым пользователем всей цепочки блоков. Предлагается использовать криптографические аккумуляторы для хранения хранилища постоянного размера для аутентификации доменов [3].

Конструкция *Certcoin* имеет преимущества от полностью децентрализованной архитектуры, предлагающей присущую отказоустойчивость, избыточность и прозрачность, а также решает многие проблемы, присущие текущим *PKI*, такие как потребность в доверенной третьей стороне и ограниченная доступность.

Другая реализация технологии блокчейн в *PKI* была предложена компанией *Guardtime*. Она имеет название *Keyless Signature Infrastructure (KSI)* – инфраструктура подписи без ключей. *KSI* – блокчейн-технология, обеспечивающая масштабные проверки подлинности данных без опоры на централизованный доверенный орган.

Подписи без ключа реализуются на практике в виде многозначных подписей, т.е. одновременно подписывается много документов. Процесс подписания включает в себя следующие шаги:

1. Хеширование: документы, которые должны быть подписаны, хешируются, а хеш-значения используются для представления документов в остальной части процесса.

2. Агрегация: создается глобальное временное дерево хэшей для каждого круга, чтобы представлять все документы, подписанные во время круга. Продолжительность может меняться, но в рабочем решении она устанавливается на одну секунду.

3. Публикация: корневые хэш-значения деревьев агрегации собираются в постоянное хэш-дерево, а корневое хэш-значение этого дерева публикуется как точка доверия.

Применение *KSI* обеспечивает сохранность, прозрачность и целостность информации, оберегая данные от непредвиденного изменения или удаления из-за системных сбоев, хакерских атак и действий вредоносного программного обеспечения [4].

Библиографический список

1. Горбатов В.С., Полянская О.Ю. Основы технологии PKI. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004.

2. Fromknecht C., Velicanu D., Yakoubov S. CertCoin: A NameCoin Based Decentralized Authentication System [Электронный ресурс]: MIT. – URL: <https://courses.csail.mit.edu/6.857/2014/files/19-fromknecht-velicanu-yakoubov-certcoin.pdf> (дата обращения: 08.05.18).

3. Nelly Fazio, Antonio Nicolosi. Cryptographic accumulators: Definitions, constructions and applications [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.cs.stevens.edu/~nicolosi/tech-reports/FaNi03.pdf> (дата обращения: 08.05.18).

4. Ahto Buldas, Andres Kroonmaa, Risto Laanoja. Keyless Signatures Infrastructure: How to Build Global Distributed Hash-Trees [Электронный ресурс]. – URL: <https://guardtime.com/files/BuKL13.pdf> (дата обращения: 08.05.2018).

Сведения об авторах

Субботина Полина Дмитриевна – студентка Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КЗИ-14-16, г. Пермь, e-mail: polyuch@gmail.com.

Кротова Елена Львовна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Высшая математика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: lenkakrotova@yandex.ru.

С.П. Хиков

БОТНЕТ MIRAI КАК УГРОЗА ТЕХНОЛОГИИ «ИНТЕРНЕТ ВЕЩЕЙ»

В данной статье описан ботнет Mirai. Рассмотрены его устройство и принцип работы. Приведена историческая последовательность событий, связанная с ним.

Ключевые слова: киберугроза, ботнет, Mirai, Интернет вещей, DDoS.

S.P. Khikov

THE BOTNET MIRAI AS A THREAT OF TECHNOLOGY “INTERNET OF THINGS”

In this article the botnet Mirai is described. Its structure and operating principle are considered. The historical sequence of events associated with it is given.

Keywords: cyberthreat, botnet, Mirai, IoT, DDoS.

Люди продолжают окружать себя электроникой, которая умеет выходить в Интернет: телефоны, компьютеры, телевизоры, холодильники и многое другое. Однако мало кто осознает, что пространство Интернета кишит киберугрозами, способными причинить непоправимый вред беспечным пользователям. Не только в финансовом, но и в личном плане [1]. А ботнеты на сегодняшний день считаются самыми серьезными из киберугроз.

Ботнет представляет из себя сеть, состоящую из устройств, на которых скрытно установлен бот – автономное вредоносное ПО, позволяющее злоумышленникам удаленно выполнять любые действия с использованием вычислительных ресурсов зараженных машин. Как правило, используются для нелегальной и вредоносной деятельности – рассылки спама, вирусов, похищения личных данных или проведения DDoS-атак [2].

Сами боты – это набор программного обеспечения, которое может состоять из вирусов, вредоносных кодов, программ для удаленного управления устройством, инструментов для скрытия присутствия от операционной системы [3].

За последнее время состав устройств, которые входят в ботнет, изменился. Если раньше это были компьютеры, роутеры и серверы, то сейчас в них входит все больше Интернет вещей или IoT (Internet of Things), т.е. различные устройства, подключенные к Интернету. Так, по данным компании Garther, в начале 2017 года их насчитывалось 6 миллиардов [4], а защита таких устройств на порядок хуже, чем у тех же серверов и персональных компьютеров.

Злоумышленники давно положили свой взгляд на IoT-устройства, но именно ботнет под названием Mirai, в большинстве состоящий из них, в 2016 году продемонстрировал, насколько они уязвимы и к чему это может привести.

Первоначальный вариант Mirai стал возможным из-за использования одинакового, неизменного, установленного производителем пароля для доступа к учетной записи администратора. Он содержит список из 62 таких записей и распространяется с помощью брутфорс-атаки на порт telnet. Mirai технически может заразить любое устройство при успешном входе в систему, он направлен на устройства, использующие BusyBox (упрощенный набор распространенных UNIX-утилит командной строки, который используется в качестве основного интерфейса во встраиваемых операционных системах [5]). Если BusyBox отсутствует, то произойдет сбой заражения. Когда вход удался, вредоносное ПО попытается заблокировать все, что работает на портах 22, 23 и 80, по сути, предотвращая заражение другими вредоносными программами [6].

Mirai состоит из следующих компонентов:

- командный центр (C&C), который содержит MySQL-базу всех зараженных IoT-устройств (ботов) и осуществляет раздачу команд промежуточным серверам распределения команд;

- компонент приема результатов сканирования ботов (Scan Receiver), задача которого заключается в сборе результатов работы от ботов и последующее их перенаправление компоненту загрузки бота на уязвимые устройства (Distributor);

- компонент загрузки, который осуществляет доставку бинарного файла бота на уязвимое устройство (для этого он использует утилиты wget и tftp, но если они отсутствуют в операционной системе, то данный компонент использует свой проприетарный загрузчик);

- бот, который после запуска на зараженном устройстве осуществляет подключение к командному центру, сканирует диапазон

IP-адресов (SYN-сканирование) на предмет уязвимых IoT-устройств и отправляет результаты сканирования компоненту Scan Receiver для последующей загрузки вредоносного кода на устройство [7].

По сути, Mirai работает просто: он сканирует Интернет в поисках уязвимых для брутфорса и взлома IoT-устройств, доступных через telnet. Он поражает преимущественно камеры наблюдения, DVR и роутеры, а затем продолжает размножаться, подобно червю [8]. В зоне риска находятся только устройства с заводскими настройками или совсем слабой защитой [5].

В итоге такого нехитрого подхода удалось заразить большое количество устройств. Так, согласно данным ИБ-исследователей только за первые 20 часов работы Mirai заразил более 65 000 девайсов [9].

Сначала от рук хакеров пострадал журналист Брайан Кребс, который писал об информационной безопасности. В конце сентября 2016 года его сайт подвергся серии DDoS-атак, чья пиковая мощность достигала 620 Гбит/с, а атака длилась 4 дня. Как тогда сообщали Кребс и представители компании Akamai, которая на протяжении нескольких лет предоставляла журналисту защиту и хостинг совершенно бесплатно, атака осуществлялась при помощи пакетов GRE (Generic Routing Encapsulation), что весьма необычно. Также стало известно, что большинство мусорного трафика генерировали различные IoT-устройства: роутеры, IP-камеры, DVR и так далее.

Когда мощность атаки достигла 620 Гбит/с, поддержка блога Кребса стала слишком накладной затеей. Специалисты Akamai были вынуждены отказать журналисту в дальнейшей защите его ресурса, так как перед ними встал выбор: продолжать защищать сайт Кребса и, вероятно, потерпеть фиаско (что привело бы к уходу в офлайн и других клиентов компании) или же отказаться от поддержки журналиста. Выбор был очевиден [10].

После Akamai представила отчет, где говорилось, что это была самая мощная атака, которую она зафиксировала на сегодняшний день (предыдущая была летом 2016 года и составила в 363 Гбит/с). Есть факты, которые отличают ее от «стандартного DDoS». Самое главное, атака была создана ботнетом, который состоял в основном из устройств «Интернет вещей». Большинство этих устройств были идентифицированы как камеры и видеорегистраторы [11]. Также было отмечено, что данная атака задействовала значительное количество трафика, шедшего напрямую от ботнета к жертве, в отличие от

случаев, когда злоумышленники используют отраженный или усиленный трафик, эксплуатируя уязвимости в NTP и DNS [10].

Затем об атаке сообщили представители французского хостинг-провайдера OVH, которым повезло еще меньше, чем Кребсу.

Атака состоялась 19 сентября 2016 года. Согласно заявлению основателя и руководителя OVH Октава Клаба атака была осуществлена посредством ботнета, состоящего из 145 607 камер и способного генерировать атаки мощностью до 1,5 Тбит/с, используя пакеты типа: tcp/ack, tcp/ack+psh и tcp/syn [12].

А к концу октября 2016 года был атакован DNS-провайдера Dyn, из-за чего с перебоями работали социальные сети, новостные сайты, популярные стриминговые сервисы. Практически недоступны оказались Twitter, Reddit, PayPal, Soundcloud, GitHub, HBO, CNN, Starbucks и многие другие [13]. Это событие коснулось многих пользователей Интернета, в том числе и российских.

Согласно официальному заявлению представителей Dyn основным источником атаки являлся ботнет Mirai, и для нападения было задействовано порядка 100 000 инфицированных IoT-устройств. Атака осуществлялась посредством пакетов TCP и UDP, через 53-й порт [14]. Компания также объявила, что никогда не сможет определить полную мощность нападения, с которым она столкнулась: «Были некоторые сообщения о величине в диапазоне 1,2 Тбит/с; сейчас мы не можем проверить эти данные» [15].

После случившегося Джастин Пейн, директор по безопасности Cloudflare, одной из ведущих в отрасли компаний по защите от DDoS атак, сказал, что атака Dyn из Mirai сразу же привлекла внимание специалистов. «Когда Mirai действительно вышел на сцену, люди, которые управляют Интернетом за кулисами, собрались вместе. Мы все поняли, что это не то, что просто влияет на мою компанию или мою сеть, – это может поставить под угрозу весь Интернет. Dyn повлиял на весь Интернет» [16].

Еще больше обеспокоились в ФБР. Если до этого происшествия Mirai уже интересовались, то после такой демонстрации силы они поняли всю серьезность этой угрозы. Еще одна причина, их волновавшая, это то, что скоро должны были пройти выборы президента в США, и Mirai мог повлиять на них.

Через год, в декабре 2017 года, на официальном сайте Министерства юстиции США [17] был опубликован пресс-релиз и целая

подборка судебных документов, согласно которым создателями оригинальной версии Mirai, которых арестовали, были три друга: 21-летний Парас Джа из Нью-Джерси, 20-летний Джозайя Уайт из Пенсильвании и 21-летний Далтон Норман из Луизианы. Они признали свою вину. Как выяснилось, Mirai-ботнет использовали не только для DDoS-атак, но и для массового кликфрода. К тому же Джа признал свою вину в публикации исходных кодов Mirai и неоднократных DDoS-атаках против собственного Рутгерского университета, серверы которого он неоднократно уводил в оффлайн в период с ноября 2014 по сентябрь 2016 года [13].

В том же 2017 году, чтобы помочь предотвратить и смягчить последствия будущих преступлений с использованием устройств IoT, подразделение кибербезопасности уголовного отдела Министерства юстиций США и Ассоциация потребителей технологий (Consumer Technology Association) предоставили следующие предложения владельцам устройств IoT:

- 1) подумайте о защите IoT-устройства сразу после покупки. Устройство IoT, которое не защищено надлежащим образом, может быть взломано и использовано в течение нескольких минут после подключения к Интернету. Имейте это в виду. Перед использованием нового устройства посетите веб-сайт производителя и загрузите новые патчи безопасности для известных уязвимостей. Кроме того, сбросьте все пароли, установленные по умолчанию;

- 2) установите безопасные пароли. Правильная безопасность паролей имеет решающее значение для информации независимо от того, защищает ли этот пароль IoT-устройство, настольный компьютер, маршрутизатор, Wi-Fi или онлайн-аккаунт. Пароли должны быть трудно угадываемыми и быть уникальными для каждого устройства;

- 3) обновляйте прошивку, когда это возможно. Чтобы IoT-устройство было защищено, важно его зарегистрировать для любых автоматических обновлений прошивки, предлагаемых производителем. Если они недоступны, стоит периодически проверять веб-сайт производителя обновлений прошивки и патчей;

- 4) отключайте IoT-устройства, когда они не используются, или перезагружайте, если они всегда включены. Вредоносные программы хранятся в памяти и часто могут быть удалены выключением и включением устройства. Соответственно, нужно отключать любые интеллектуальные устройства, когда они не используются;

5) защите маршрутизаторы и сети Wi-Fi. Чтобы IoT-устройства были защищены, важно обеспечить безопасность домашних маршрутизаторов и сетей Wi-Fi, к которым они регулярно подключены;

6) избегайте единой точки отказа. Одно уязвимое IoT-устройство может позволить злоумышленнику проникнуть в сеть и получить доступ к другим устройствам этой сети. Чтобы минимизировать потенциальный вред, причиненный одной скомпрометированной умной вещью, многие маршрутизаторы позволяют «сегментировать» домашнюю сеть. Чем больше сегментировать сеть, тем труднее будет для хакеров получить доступ к устройствам и информации;

7) рассмотрите использование продуктов для обнаружения вирусов и вторжений, которые защищают IoT-устройства [18].

Использование таких мер сможет повысить уровень безопасности устройств, но не гарантирует, что какой-нибудь новый ботнет не заразит их. Ведь после публикации исходных кодов дело Mirai живет как ни в чем не бывало, хотя Джа, Уайт и Норман ожидают решения суда.

Библиографический список

1. Онлайн-угрозы [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.avast.ru/c-online-threats> (дата обращения: 25.04.2018).

2. Ботнет [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.avast.ru/c-botnet> (дата обращения: 25.04.2018).

3. Botnets – The Killer Web App / Craig A. Schiller, Jim Binkley, David Harley [et al.] / Rockland, Massachusetts: Syngress Publishing, 2007.

4. Gartner Says 8.4 Billion Connected "Things" Will Be in Use in 2017, Up 31 Percent From 2016 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.gartner.com/newsroom/id/3598917> (дата обращения: 25.04.2018).

5. Откуда взялся Mirai? Разбираемся, как устроен ботнет из видеокамер [Электронный ресурс]. – URL: <https://tproger.ru/news/about-mirai/> (дата обращения: 25.04.2018).

6. MalwareTech. Mapping Mirai: A Botnet Case Study [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.malwaretech.com/2016/10/mapping-mirai-a-botnet-case-study.html> (дата обращения: 25.04.2018).

7. Макрушин Денис. Так ли страшен Mirai, как его малюют? [Электронный ресурс]. – URL: <https://securelist.ru/is-mirai-really-as-black-as-its-being-painted/29820/> (дата обращения: 25.04.2018).

8. Нефёдова Мария. В состав ботнета Mirai входят порядка 120 000 IoT-устройств [Электронный ресурс]. – URL: <https://xakep.ru/2016/10/04/mirai-mapping/> (дата обращения: 25.04.2018).

9. Understanding the Mirai Botnet [Электронный ресурс] / Manos Antonakakis, Tim April, Michael Bailey [et al.] // Proceedings of the 26th USENIX Security Symposium, Vancouver, British Columbia, Canada, August 16–18, 2017. – URL: https://2459d6dc103cb5933875-c0245c5c937c5dedcca3f1764ecc9b2f.ssl.cf2.rackcdn.com/sec17/sec17_full_proceedings.pdf (дата обращения: 24.04.2018).

10. Нефёдова Мария. Компания Akamai опубликовала детальный отчет о DDoS-атаках на сайт Брайана Кребса [Электронный ресурс]. – URL: <https://xakep.ru/2016/10/06/akamai-about-krebs-ddos/> (дата обращения: 25.04.2018).

11. Akamai. 620+ gbps attack – post mortem [Электронный ресурс]. – URL: <https://blogs.akamai.com/2016/10/620-gbps-attack-post-mortem.html> (дата обращения: 25.04.2018).

12. Нефёдова Мария. Более 150 000 IoT-устройств были задействованы в ходе DDoS-атаки мощностью 1 Тб/с [Электронный ресурс]. – URL: <https://xakep.ru/2016/09/30/ovh-ddos/> (дата обращения: 25.04.2018).

13. Нефёдова Мария. Создатели малвари Mirai признали себя виновными [Электронный ресурс]. – URL: <https://xakep.ru/2017/12/15/mirai-creators/> (дата обращения: 25.04.2018).

14. Нефёдова Мария. DNS-провайдер Dyn представил анализ DDoS-атаки: виной всему ботнет из 100 000 IoT-девайсов [Электронный ресурс]. – URL: <https://xakep.ru/2016/10/27/dyn-ddos-statement/> (дата обращения: 25.04.2018).

15. Scott Hilton. Dyn Analysis Summary Of Friday October 21 Attack [Электронный ресурс]. – URL: <https://dyn.com/blog/dyn-analysis-summary-of-friday-october-21-attack/> (дата обращения: 25.04.2018).

16. Garrett M. Graff. How a dorm room Minecraft scam brought down the Internet [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.wired.com/story/mirai-botnet-minecraft-scam-brought-down-the-internet/> (дата обращения: 25.04.2018).

17. Department of Justice: Defendants Responsible for Creating “Mirai” and Clickfraud Botnets, Infecting Hundreds of Thousands of IoT Devices with Malicious Software [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.justice.gov/opa/pr/justice-department-announces-charges-and-guilty-pleas-three-computer-crime-cases-involving> (дата обращения: 25.04.2018).

18. The Cybersecurity Unit of the Computer Crime and Intellectual Property Section of the Criminal Division of the U.S. Department of Justice, the Consumer Technology Association. Securing Your “Internet of Things” Devices [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.justice.gov/criminal-ccips/page/file/984001/download> (дата обращения: 27.04.2018).

Сведения об авторе

Хиков Семен Павлович – студент Пермский Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КЗИ-14-16, г. Пермь, e-mail: Feg200@yandex.ru

В.А. Чалин

СПОСОБЫ ОБНАРУЖЕНИЯ СКРЫТЫХ ПРОЦЕССОВ, СВЯЗАННЫХ С МАЙНИНГОМ КРИПТОВАЛЮТ

В данной статье рассмотрен анализ способов обнаружения скрытого процесса, связанного с майнингом криптовалют, путем установки майнингового программного обеспечения.

Ключевые слова: майнер, процесс, скрытый майнинг, криптовалюты, блокчейн.

V.A. Chalin

METHODS OF DETECTING HIDDEN PROCESSES RELATED TO MINING OF CRYPTUALTS

In this article, an analysis of methods for detecting the hidden process of crypto-currency related to mining by analyzing the installation of the mining software.

Keywords: miner, process, hidden mining, cryptocurrency, blockchain.

Процесс добычи любой криптовалюты, именуемый как «майнинг», сводится к решению некой сложной криптозадачи (подбор хэша), для которой не известно лучшего подхода, чем брутфорс.

Не углубляясь в тонкости технологии добычи, стоит сказать, что решением задачи занимаются узлы распределенной сети, имеющие любые вычислительные мощности.

Для злоумышленника, не имеющего в наличии нужных вычислительных мощностей, единственным выходом из ситуации представляется заражение других серверов и компьютеров программным обеспечением – скрытым майнером, позволяющим добывать криптовалюту несанкционированным использованием ресурсов устройства.

Несанкционированная установка майнера. Стоит отметить что майнинг криптовалюты сам по себе не является противозаконным, благодаря высокой рентабельности скрытого майнинга им начинают пользоваться в корыстных целях, а именно установкой выше упомянутого ПО. Работа майнера построена на использовании ресур-

сов компьютера: GPU (Graphic Processing Unit) – графический процессор и CPU (Central Processing Unit) [2, 3].

Этапы несанкционированной установки майнера на компьютер жертвы проиллюстрированы в блок-схеме (рис. 1) [3].

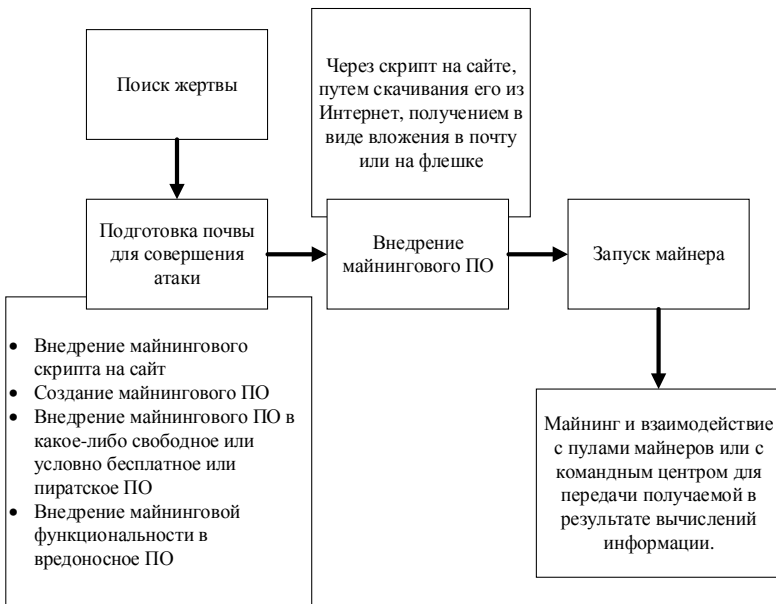


Рис. 1. Этапы заражения компьютера жертвы

Анализ способов обнаружения майнингового ПО. Рассмотрим поэтапное умышленное заражение компьютера программой майнером с последующими операциями по устранению последствий. В исследовании использовался майнер, в формате .exe в Интернете можно встретить его маскирующимся под иные программы.

Установка. Сразу после распаковки архива файл был удален антивирусом Eset Nod32. Стоит отметить, что только Eset распознал вирус еще до его запуска (т.е. до самого факта майнинга).

Антивирусы, не удалившие скаченное ПО:

- Касперского;
- Avast;
- Avira Antivir.

Запуск. Следующим моим шагом был запуск майнера. Сразу после запуска охлаждающая система компьютера начала издавать гул, что сигнализировало о повышенной нагрузке на процессор и видеокарту (рис. 2).

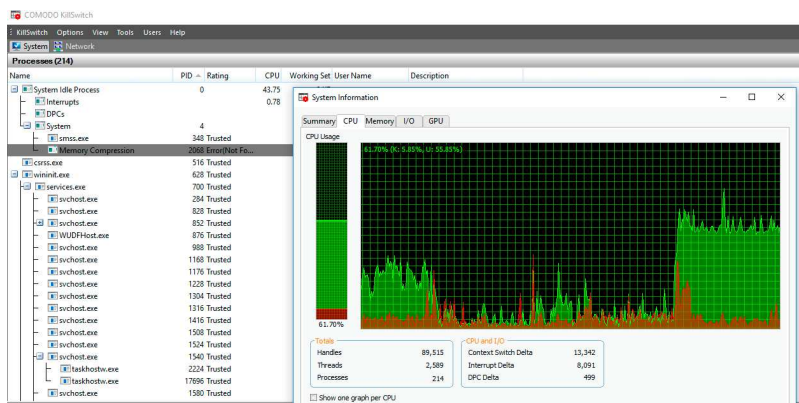


Рис. 2. Показатели нагрузки CPU в программе COMODO KillSwitch

Обнаружение майнера. Попытки обнаружения запущенного вредоносного процесса путем запуска стандартных инструментов Windows, таких как диспетчер задач, не привели к успеху по причине того, что в скрытый майнер вшита функция «Маскировки».

Благодаря этой функции процесс, нагружающий систему, входит в спячку при запуске следующих программ:

- Process Hacker;
- диспетчер задач;
- мониторинг ресурсов.

Обнаружить процесс удалось программой KillSwitch. Можно увидеть, как при запуске диспетчера задач производительность компьютера приходит в норму (рис. 3).

Далее оставалось обнаружить запущенный процесс по выдающим его характеристикам: в программе KillSwitch был отсортирован список процессов по количеству потребляемых ресурсов (CPU). После чего был обнаружен дубликат системного процесса taskhost, потребляющий 50 % ресурсов CPU (рис. 4).

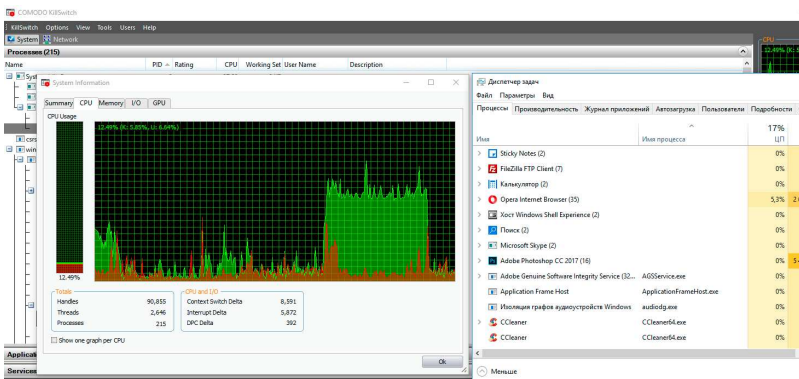


Рис. 3. Показатели нагрузки CPU после запуска диспетчера задач

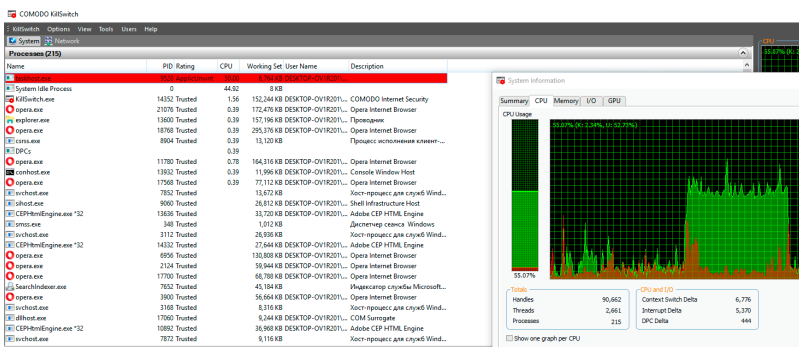


Рис. 4. Обнаружение процесса, влияющего на производительность системы

Выявление и удаление процесса и последствий установки.

После обнаружения необходимо было удалить процесс. Перейдя в папку с файлами, отвечающими за работу процесса, был замечен еще один факт «маскировки». Оказывается в корне диска C создается дубликат системной папки ProgramData с одной измененной русской буквой (рис. 4).

После первого запуска вредоносного ПО в системе Windows произошли некоторые изменения. В частности, в автозагрузку были добавлены новые строки, содержащие в себе название одной из папок (DeviceMetadataStore) найденного майнера, маскирующиеся под обновления MicrosoftOffice.

Заключение. В результате проведенного мной исследования были выявлены эффективные способы обнаружения маскирующегося процесса. Из используемых антивирусов самым надежным оказался Eset Nod32, из программ для поиска руткитов и скрытых процессов – COMODO Killswitch

Библиографический список

1. Почему майнинг на видеокарте быстрее майнинга на процессоре? [Электронный ресурс]. – URL: https://bits.media/GPU_vs._CPU_mining (дата обращения: 10.05.2018).
2. Как бороться с майнерами криптовалют в корпоративной сети [Электронный ресурс]. – URL: <https://habr.com/company/cisco/blog/345200> (дата обращения: 10.05.2018).
3. В чем разница между CPU и GPU? [Электронный ресурс]. – URL: <https://tproger.ru/articles/cpu-and-gpu> (дата обращения: 10.05.2018).

Сведения об авторе

Чалин Владислав Александрович – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КЗИ-14-1б, г. Пермь, e-mail: chalin2008@yandex.ru

А.А. Чегодаев, А.Н. Каменских

ПРИНЦИПЫ И ПРОБЛЕМЫ ЗАЩИТЫ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ БАЗ ДАННЫХ

В данной работе рассматриваются проблемы защиты распределенных баз данных в связи с несовершенством методик защиты, а также некоторые способы повышения безопасности распределенных баз данных.

Ключевые слова: базы данных, распределенные базы данных, принципы и проблемы защиты, информационная безопасность.

A.A. Chegodaev, A.N. Kamenskikh

PRINCIPLES AND PROBLEMS OF PROTECTION OF DISTRIBUTED DATABASES

This paper describes the problems of protecting distributed databases, as well as some ways to improve the security of distributed databases.

Keywords: databases, distributed databases, principles and problems of protection, information security.

В общем случае под базой данных (БД) подразумевается совокупность сведений, объединенных по какому-то признаку.

Базы данных предназначены для хранения и обработки большого количества однородной информации, которая может представлять собой, например, сведения о сотрудниках университета, справочник лекарственных средств, результаты измерения температуры, давления и влажности в течение года, сведения о банковских вкладах, список счетов для оплаты телефонных переговоров и т. д.

Распределённая база данных – база данных, составные части которой размещаются в различных узлах компьютерной сети в соответствии с каким-либо критерием.

Система управления базами данных (СУБД) – это комплекс программных средств, предназначенный для создания, ведения и совместного использования БД многими пользователями.

С точки зрения конечного пользователя, распределенная база данных выглядит в точности так, как и обычная, нераспределенная. Для сравнения распределенной и нераспределенной базы данных бы-

ли взяты определенные критерии. Как ясно из определения, распределенная база данных расположена в разных участках сети, в то время как нераспределенная база данных находится в одном узле сети.

Опорным узлом является узел, без которого база данных не сможет работать. Эта проблема касается нераспределенных баз данных. У распределенных же баз данных, так как они располагаются в разных узлах сети, как правило, нет опорного узла. Обладают независимостью от расположения. Другими словами, пользователь должен получать доступ к базе данных с любого узла. У обеих видов баз данных этот критерий выполняется.

Распределенная база данных поддерживает выполнение распределенных транзакций как единицы восстановления.

Подразумевается программное обеспечение, через которое пользователь получает доступ к базе данных. В распределенной базе данных возможно использование разных программ для доступа [1].

Результат сравнения баз данных по вышеуказанным критериям представлены в таблице.

Результаты сравнения

Критерий	Нераспределенная база данных	Распределенная база данных
Физическое расположение	В одном узле сети	В нескольких узлах сети
Опорный узел	Есть	Нет
Независимость от расположения	Есть	Есть
Транзакция	Нераспределенная	Распределенная
Программное обеспечение	Одно	Как одна, так и несколько

В ходе работы обнаружилось 3 основных угрозы, характерные для распределенных баз данных.

Человек посередине, что очень актуально для распределенных баз данных, которые расположены в разных узлах сети. Для атаки типа «человек посередине» (Man-in-the-Middle) хакеру нужен доступ к пакетам, передаваемым по сети. Такой доступ ко всем пакетам, передаваемым от провайдера в любую другую сеть, может, к примеру, получить сотрудник этого провайдера. Для атак этого типа часто используются sniffеры пакетов, транспортные протоколы и протоколы маршрутизации. Атаки проводятся с целью кражи информации,

перехвата текущей сессии и получения доступа к частным сетевым ресурсам, а также для анализа трафика и получения информации о сети и ее пользователях, для проведения атак типа DoS, искажения передаваемых данных и ввода несанкционированной информации в сетевые сессии.

Эффективно бороться с атаками типа Man-in-the-Middle можно только с помощью криптографии. Если хакер перехватит данные зашифрованной сессии, у него на экране появится лишь бессмысленный набор символов. Следует иметь в виду, что если хакер получит информацию о криптографической сессии (например, ключ сессии), то это может сделать возможной атаку Man-in-the-Middle даже в зашифрованной среде [2].

Отказ в доступе (DoS) из-за невыполнения транзакции к одной из баз данных. Атаки DoS отличаются от других атак. Они не нацелены на осуществление доступа к вашей сети или на получение из нее какой-либо информации. Атака DoS делает вашу сеть недоступной для обычного ее использования из-за наступающего вследствие подобной агрессии превышения допустимых параметров функционирования сети, ее операционной системы или приложения.

В случае использования некоторых серверных приложений (таких как веб-сервер или FTP-сервер) атаки DoS могут приводить к тому, что все соединения, доступные для этих приложений, окажутся занятыми, и обслуживание обычных пользователей станет невозможным.

Большинство атак DoS удается осуществить не из-за программных ошибок или брешей в системе безопасности, а по причине общих слабостей системной архитектуры. Некоторые атаки сводят к нулю производительность сети, переполняя ее нежелательными и ненужными пакетами или сообщая ложную информацию о текущем состоянии сетевых ресурсов [3].

Угрозу атак типа DoS можно снижать тремя следующими способами:

- использование функции антиспуфинга – правильная конфигурация функций антиспуфинга на маршрутизаторах и межсетевых экранах предполагает включение, как минимум, фильтрации RFC 2827. В этом случае хакер уже не сможет замаскировать свою истинную личность и вряд ли решится провести атаку;

- реализация функции антиDoS – правильная конфигурация функций антиDoS на маршрутизаторах и межсетевых экранах может ограничить эффективность атак. Эти функции часто уменьшают число полукоткрытых каналов в любой момент времени;

– ограничение объема трафика (traffic rate limiting) – организация может попросить провайдера (ISP) ограничить объем трафика. Этот тип фильтрации позволяет уменьшить объем некритического трафика в вашей сети. Распространенное ограничение объемов трафика ICMP, который используется только для диагностических целей. А такие атаки, как (D)DoS, как раз часто используют ICMP.

Атаки на уровне приложений актуальны для распределённых баз данных тем, что в них могут использоваться разные программные обеспечения или одно, но разной версионности. Атаки на уровне приложений могут проводиться несколькими способами. Самый распространенный из них состоит в использовании хорошо известных слабостей серверного программного обеспечения (sendmail, HTTP, FTP). Используя эти слабости, хакеры могут получить доступ к компьютеру от имени пользователя, работающего с приложением (обычно это бывает не простой пользователь, а привилегированный администратор с правами системного доступа). Сведения об атаках на уровне приложений широко публикуются, чтобы дать возможность администраторам устранить проблему с помощью коррекционных модулей (патчей). К сожалению, многие хакеры также имеют доступ к этим сведениям, что позволяет им обучаться [4].

Вот некоторые меры, которые можно предпринять, чтобы снизить уязвимость для атак подобного типа:

- просмотр лог-файлов операционных систем и сетевых лог-файлов, их анализ с помощью специальных аналитических приложений;
- использование самых свежих версий операционных систем и приложений и самых последних коррекционных модулей (патч);
- использование кроме системного администрирования систем распознавания атак (IDS).

Большинство современных предприятий в случае возникновения потребности в защите распределенной базы данных, просматривая методики по защите, не учитывают все опасности ввиду отличия обычной базы данных от распределенной. В этой статье рассмотрены лишь наиболее часто встречающиеся угрозы, а также простые способы их избегания или уменьшения. Однако необходимо помнить, что защита информации может быть обеспечена только при разработке и внедрении комплекса программных, аппаратных и организационных мер для конкретного объекта информационной деятельности.

Библиографический список

1. Методы защиты сетевого трафика [Электронный ресурс]. – URL: http://www.rusnauka.com/18_APSN_2014/Informatica/4_173276.doc.htm (дата обращения: 20.09.2017).
2. Дэвид М. Ахмад., Идо Дубравский, Хал Флинн. Защита от хакеров корпоративных сетей. – 2-е изд. – М.: Компания АйТи; ДМК-Пресс, 2002. – 358 с.
3. IPsec [Электронный ресурс]. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/IPsec> (дата обращения: 15.10.2017).
4. Защита информации в распределенных базах данных [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.studmed.ru/docs/document24465/content> (дата обращения: 15.12.2017).

Сведения об авторах

Чегодаев Александр Алексеевич – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КЗИ-14-1б, г. Пермь, e-mail: reddec2@rambler.ru.

Каменских Антон Николаевич – старший преподаватель кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: antoshkinoinfo@yandex.ru.

Р.В. Чураков, А.Н. Кокоулин

ИЕРАРХИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ОБНАРУЖЕНИЯ ВТОРЖЕНИЙ ДЛЯ БЕСПРОВОДНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ

В последние годы технологии беспроводных самоорганизующихся сенсорных сетей становятся все более популярными. Однако существует серьезная проблема в обеспечении информационной безопасности для сенсорных сетей, развертываемых в открытой и незащищенной среде. В большинстве случаев использования только алгоритмов криптографической защиты недостаточно для защиты сенсорной сети от внешних атак, поэтому целесообразно использовать систему обнаружения и предотвращения вторжений. Вопросы создания таких систем в гетерогенных беспроводных самоорганизующихся сетях являются актуальными.

Ключевые слова: беспроводная сенсорная сеть, система обнаружения вторжений, иерархическая схема, информационная безопасность.

R.V. Churakov, A.N. Kokoulin

HIERARCHICAL DESIGN BASED INTRUSION DETECTION SYSTEM FOR WIRELESS INDUSTRIAL AD HOC SENSOR NETWORK

In recent years, wireless ad-hoc sensor networks have become increasingly popular. However, there is a serious problem in providing information security for sensor networks deployed in an open and unprotected environment. In most cases, using only cryptographic protection algorithms is not enough to protect the sensor network from external attacks, therefore it is advisable to use the Intrusion Detection and Prevention System. The questions creation of such systems in heterogeneous wireless ad-hoc networks are offer relevant.

Keywords: WSN, IDS, Hierarchical Design, Information Security.

Введение. Существующие системы обнаружения вторжений не являются подходящими для защиты беспроводных сенсорных сетей от внутренних и внешних угроз, так как ни одна из них не является полной. Например, некоторые обнаруживают только вторжение, а некоторые из них получают дополнительную информацию, например, тип атаки, местоположения злоумышленника и т. д. Большинство существующих СОВ имеют дело с проводной архитектурой, за

исключением их беспроводного аналога. Архитектура беспроводной сенсорной сети еще сложнее, чем архитектура беспроводной самоорганизующейся сети. Требуется СОВ с возможностью обнаружения внутри и снаружи, известных и неизвестных атак с низким уровнем ложной тревоги. Хотя для беспроводной самоорганизующейся сети предлагается большое количество механизмов СОВ, очень немногие из них могут быть применимы для беспроводной сенсорной сети (БСС) из-за ограниченности ресурсов: вычислительной мощности, памяти, питания батареи и т. д.

1. Архитектура беспроводной сенсорной сети. Беспроводная сенсорная сеть – распределённая, самоорганизующаяся сеть множества датчиков и исполнительных устройств, объединённых между собой посредством радиоканала. Область покрытия подобной сети может составлять от нескольких метров до нескольких километров за счёт способности ретрансляции сообщений от одного узла к другому. Сенсорная сеть позволяет подключать до 65 000 датчиков [1].

Беспроводные сенсорные сети (БСС) состоят из двух основных типов узлов:

1. Сенсоры (сенсорные узлы), которые развертывают в местах мониторинга (сенсорное поле) для сбора данных изучаемого явления или процесса и их передачи на базовые станции, где осуществляется централизованное управление и сбор данных.

2. Базовая станция (БС), также известная как шлюз (Gateway) или приемник (Sink), является интерфейсом, соединяющим сенсорную сеть с внешним миром. БС несет ответственность за получение данных от сенсоров, их обработку и доставку конечному пользователю. Как правило, базовые станции – это мощные устройства с большим объёмом памяти для хранения входящих данных. Базовая станция может иметь неограниченное количество источников питания и высокую пропускную способность канала для связи с другими базовыми станциями. Узлы беспроводных датчиков, напротив, являются маломощными, обладают низкой пропускной способностью и короткой дальностью связи.

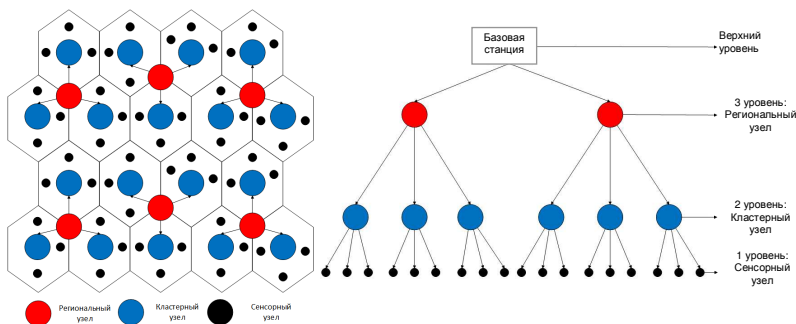
2. Архитектура СОВ. Система обнаружения вторжений – это аппаратное или программное средство, которое контролирует и проверяет компьютерную систему или сеть на наличие вредоносной активности или нарушения правил. Системы обнаружения вторжений классифицируются по используемому методу обнаружения вторжений следующим образом:

– Signature-based (сигнатурный метод). Этот метод обнаруживает атаки путем поиска определенных шаблонов, таких как последовательности байтов в сетевом трафике или известные вредоносные последовательности команд, используемые вредоносными программами.

– Anomaly-based (метод аномалий). Метод аномалий используется для обнаружения неизвестных атак. Создаётся модель нормального поведения пользователей, а затем сравнивается с новой моделью поведения. Хотя такой метод позволяет обнаруживать ранее неизвестные атаки, он может страдать от ложных срабатываний: ранее неизвестная законная деятельность может быть классифицирована как вредоносная.

– Specification-based (метод спецификаций). COB на основе спецификации определяет протокол или правильную работу программы. Вторжение обозначается в соответствии с этими ограничениями. Такая COB может обнаруживать неизвестные атаки, при этом показывая низкий процент ложных срабатываний [2].

3. Новая модель COB. Новая модель COB сосредоточена на экономии мощности сенсорных узлов, распределяя ответственность за обнаружение вторжений на трехуровневые узлы с помощью системы управления сетью на основе политик. Модель использует иерархическую схему наложения (рисунок).



Каждая область сенсорных узлов делится на гексагональную область. Сенсорные узлы в каждой из гексагональной области контролируются кластерным узлом. Затем каждый узел кластера контролируется региональным узлом. В свою очередь, региональные узлы

будут контролироваться и управляться базовой станцией. Эта СОВ на основе НОД объединяет два подхода к методам обнаружения вторжений (сигнатурный метод и метод аномалий) для борьбы с существующими угрозами. Сигнатуры известных атак распространяются от базовой станции до конечного узла уровня. Репозиторий сигнатур на каждом уровне обновляется по мере обнаружения новых форм атак в системе. Предлагаемая СОВ может идентифицировать как известные, так и неизвестные атаки.

3.1. Объекты обнаружения. Сенсорные узлы имеют два типа функциональных возможностей: зондирование и маршрутизация. Каждый из сенсорных узлов будет воспринимать среду и обмениваться данными между сенсорными узлами и узлом кластера.

Кластерный узел играет роль узла монитора для сенсорных узлов. Один кластерный узел назначается для каждой из гексагональной области. Он будет получать данные от сенсорных узлов, анализировать и обобщать информацию и отправлять ее на региональный узел. Он более мощный, чем сенсорные узлы, и обладает встроенной функцией обнаружения вторжений.

Региональный узел будет отслеживать и получать данные от соседних кластерных узлов и отправлять объединенный сигнал тревоги на базовую станцию, находящуюся на верхнем уровне. Он также является узлом монитора, как и кластерные узлы со всеми функциональными возможностями СОВ. Это делает сенсорную сеть более масштабируемой.

Базовая станция является самой верхней частью архитектуры, наделенной поддержкой человека. Она будет получать информацию от региональных узлов и распространять информацию пользователям по их требованию.

3.2. СОВ на основе политик. Политика подразумевает заданный шаблон действий, который применяется при возникновении определенных условий. Для того чтобы достигнуть управления на основе политик для СОВ, предлагаемая архитектура должна включать в себя несколько компонентов, которые оценивают следующие политики: пункт определения базовой политики (ПОБП), агент региональной политики (АРП), агент локальной политики (АЛП) и пункт обеспечения соблюдения политики (ПОСП).

ПОБП является управляющим компонентом архитектуры. Он реализует политики или правила вторжения, созданные средством обнаружения вторжений (IDT), от произошедших событий, оценки аномальных условий и применения новых правил, алгоритмов, пороговых значений и т.д. IDT поддерживает создание, удаление, модификацию и проверку конфигураций и политик агента. Он может добавлять новые объекты, например, новую сигнатуру вторжения, изменение или удаление существующих объектов в АРП и АЛП.

АЛП выполняют локальную настройку политик, фильтрацию, мониторинг и отчетность. АРП может управлять несколькими АЛП. ПОБП контролирует и управляет всеми АРП.

ПОСП – это сенсорные узлы нижнего уровня.

Политики распространяются с ПОБП на АРП и АЛП. Описанные выше агенты политики помогают СОВ реагировать на изменения статуса сети глобально или локально. Это помогает автоматически перенастроить сеть для устранения сбоев и ухудшения производительности в соответствии с ответом на вторжение.

3.3. Реагирование на вторжение. Существуют два разных подхода к реагированию на вторжение: «Горячий ответ» или «Ответ на основе политики». Горячий ответ реагирует путем запуска локального действия на целевом компьютере для завершения процесса или на целевом сенсорном узле для блокировки трафика. Например, отключить любой процесс, сброс соединения и т.д. Это не препятствует возникновению атаки в будущем. Ответ на основе политики работает в более широкой области. Он рассматривает угрозы, о которых сообщается в предупреждениях, ограничениях и объектах информационной системы. Он изменяет или создает новые правила в репозитории политик, чтобы предотвратить атаку в будущем.

Вторжение может быть обнаружено либо в кластерном узле, либо в региональном узле. Вторжения обнаруживаются автоматически в соответствии с политикой, реализованной ПОБП [3].

Заключение. В этой статье рассматривается новая архитектура СОВ для самоорганизующейся сенсорной сети на основе иерархической схемы наложения и механизма ответа в соответствии с предлагаемой архитектурой. Новая модель СОВ распределяет общую задачу обнаружения вторжения, которая приводит к высокой энергосберегающей структуре. Из-за иерархической модели система обнаружения

работает очень структурированным образом и может эффективно обнаруживать любые вторжения. В целом каждая область управляется одним головным кластером, так что обнаружение происходит очень быстро, и сигнал тревоги подается на базовую станцию через головную область, что позволяет ему принимать надлежащие меры.

Библиографический список

1. Беспроводная сенсорная сеть [Электронный ресурс] // Wikipedia.org. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Беспроводная_сенсорная_сеть (дата обращения: 25.11.2017).
2. Intrusion detection system [Электронный ресурс] // Wikipedia.org. – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Intrusion_detection_system (дата обращения: 25.11.2017).
3. Mohammad Saiful Islam Mamun. Hierarchical Design Based Intrusion Detection System for Wireless Ad hoc Sensor Network // International Journal of Network Security & Its Applications (IJNSA). – July 2010. – Vol. 2, № 3. – С. 102–117.

Сведения об авторах

Чураков Роман Валерьевич – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КЗИ-17-1м, г. Пермь, e-mail: mokaraka@yandex.ru.

Кокоулин Андрей Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: a.n.kokoulin@at.pstu.ru.

А.И. Князев, А.Н. Кокоулин

**АНАЛИЗ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ НЕЙРОННОЙ СЕТИ MOBILENET
ПРИ ПРОГРАММНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ НА ЯЗЫКАХ PYTHON
И C++ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БИБЛИОТЕКИ OPENCV
В ОБЛАСТИ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

В данной статье проведен анализ быстродействия программ распознавания образов, использующих нейронную сеть MobileNet и библиотеку компьютерного зрения OpenCV, на языках Python и C++ с выявлением лучшего варианта для реализации на маломощных машинах с целью применения в области информационной безопасности.

Ключевые слова: нейронные сети, компьютерное зрение, Python, C++, OpenCV.

A.I. Knyazev, A.N. Kokoulin

**PERFORMANCE ANALYSIS OF THE MOBILENET
NEURAL NETWORK WITH SOFTWARE IMPLEMENTATION
IN PYTHON AND C++ LANGUAGES WITH THE OPENCV
LIBRARY IN THE FIELD OF INFORMATION SECURITY**

This article analyzes the performance of image recognition programs using the MobileNet neural network and the OpenCV computer vision library in Python and C++ languages. The purpose of the article is to identify the best option for implementation on low-power machines for application in the field of information security.

Keywords: neural networks, computer vision, Python, C++, OpenCV.

Введение. В данной статье мы рассмотрим две программы, распознающие объекты на картинках, использующие для этого нейронную сеть MobileNet и написанные на языках программирования Python и C++, а также выясним, реализация на каком из языков больше подходит для работы на маломощных компьютерах, Raspberry Pi и телефонах, чтобы впоследствии применить их для разработки программ в области защиты информации. Для этого мы ознакомимся с основами нейронных сетей и напишем программы на ОС Ubuntu с использованием библиотеки OpenCV.

Задача исследования: анализ быстродействия нейронной сети MobileNet при программной реализации на языках Python и C++ с использованием библиотеки OpenCV.

Нейронные сети. Нейронная сеть – это последовательность нейронов, соединенных между собой синапсами. Структура сети и нейрона пришла в программирование из биологии. Нейронные сети используются для решения сложных задач, которые требуют аналитических вычислений подобных тем, что делает их похожими на человеческий мозг. Нейрон – это вычислительная единица, которая получает информацию, производит над ней простые вычисления и передает ее дальше. В том случае, когда нейронная сеть состоит из большого количества нейронов, вводят термин слоя.

Работа нейронной сети основана на весах синапсов. Синапс – это связь между двумя нейронами. Информация, передаваемая от одного нейрона к другому, умножается на вес синапса, после чего складывается с произведениями других информации и весов синапсов, входящих в рассматриваемый нейрон, затем полученная сумма используется в качестве аргумента некоторой функции, вычисление которой и даст результат работы нейрона. Полученный результат передается последующим нейронам, находящимся в следующем слое. Первый слой нейронов является входным. Последний слой преобразует полученные данные в необходимый нам вид. Обучение сети основано на изменении весов синапсов в соответствии с ошибкой результата от предполагаемого. При работе с распознаванием образов используются слои convolution, pooling, а также стандартные Fully Connected слои.

О сети MobileNet и библиотеке OpenCV. MobileNets – это класс сверточной нейронной сети, разработанный исследователями из Google. Сеть создавалась таким образом, чтобы потреблять мало ресурсов и быстро запускаться прямо на телефоне.

OpenCV – одна из популярных библиотек компьютерного зрения. Главную роль в реализации наших программ будет играть модуль dnn. Основная возможность dnn заключается в загрузке и запуске нейронных сетей (inference).

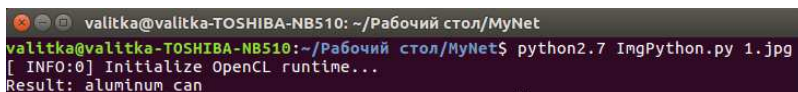
Программа на Python. Строки 6–9 (рис. 1) отвечают за загрузку нейронной сети, отправку информации в нейронную сеть и получение информации из нее. Файл deploy.prototxt содержит в себе структуру нейронной сети, а файл mobilenet_bottles_another_iter_7000.caffemodel содержит информацию о весах нейронов сети, этот файл был получен путем тренировки сети на основе файла deploy.prototxt, а также наборе изображений, соответствующих каждому из описанных ранее классов. Оба эти файла были сформированы заранее. Чтобы узнать к какому

классу нейронная сеть отнесла объект на изображении, находим максимальный аргумент из информации на выходе при помощи `out.argmax()`. Максимальный аргумент показывает, к какому классу объект подходит больше всего.

```
6. net =
cv2.dnn.readNetFromCaffe('deploy.prototxt', 'mobilenet_bottles_another_iter_7000.caffemodel')
7. blob = cv2.dnn.blobFromImage(img, 1, mean=(142.32550049, 142.50650024, 142.21803284),
swapRB=False)
8. net.setInput(blob)
9. out = net.forward()
```

Рис. 1. Фрагмент кода программы на Python

Пример работы программы показан на рис. 2.



```
valitka@valitka-TOSHIBA-NB510: ~/Рабочий стол/MyNet
valitka@valitka-TOSHIBA-NB510:~/Рабочий стол/MyNet$ python2.7 ImgPython.py 1.jpg
[ INFO:0] Initialize OpenCL runtime...
Result: aluminum_can
```

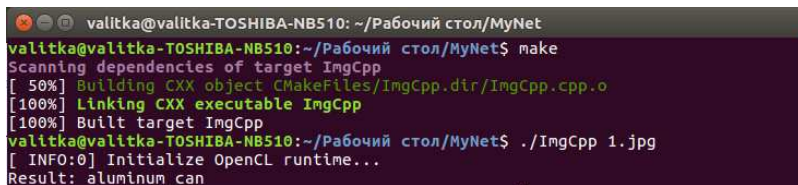
Рис. 2. Результат работы программы на Python

Программа на C++ (рис. 3).

```
13. Net net =
dnn::readNetFromCaffe("deploy.prototxt", "mobilenet_bottles_another_iter_7000.caffemodel");
14. Mat blob = blobFromImage(img, 1, Size(224,224), Scalar(142.32550049, 142.50650024, 142.21803284),
false);
15. net.setInput(blob);
16. Mat out = net.forward();
```

Рис. 3. Фрагмент кода программы на C++

Программа выполняет аналогичные функции, что и программа на Python, результат работы программы показан на рис. 4.



```
valitka@valitka-TOSHIBA-NB510: ~/Рабочий стол/MyNet
valitka@valitka-TOSHIBA-NB510:~/Рабочий стол/MyNet$ make
Scanning dependencies of target ImgCxx
[ 50%] Building CXX object CMakeFiles/ImgCxx.dir/ImgCxx.cpp.o
[100%] Linking CXX executable ImgCxx
[100%] Built target ImgCxx
valitka@valitka-TOSHIBA-NB510:~/Рабочий стол/MyNet$ ./ImgCxx 1.jpg
[ INFO:0] Initialize OpenCL runtime...
Result: aluminum_can
```

Рис. 4. Результат работы программы на C++

Анализ времени. Для проведения анализа времени работы программ обе программы были модифицированы таким образом, чтобы производились замеры времени работы интересующих нас функций.

Также для получения более корректных результатов измерения будут проводиться не на одном изображении, а на наборе из ста изображений, объекты на которых относятся к разным классам, а сами изображения при этом имеют разные размеры. Набор одинаков для программ на обоих языках программирования. Для удобства сравнения были выбраны участки кода, выполняющие схожие функции на разных языках.

Результат запуска обеих программ показан в табл. 1.

Таблица 1

Анализ времени работы функций программ

	Python	C++
Функций до цикла		
Загрузка нейронной сети	0,0951	0,1161
Средние показатели при обработке ста изображений		
Загрузка изображения	0,0074	0,0065
Формирование пакета для нейронной сети	0,0062	0,0077
Работа нейронной сети	0,0015	0,0005
Получение информации из нейронной сети	2,3057	1,4707
Определение класса объекта на картинке	0,0015	0,0013
Суммарное время	2,3225	1,4870
Итог		
Общее время	232,3590	148,9100

Анализ используемой программами памяти. Для анализа потребляемой программами памяти воспользуемся стандартной в ubuntu библиотекой time (usr/bin/time). Данная библиотека показывает время работы программы (изначально время планировалось измерять именно так, но позже было принято решение измерить время работы отдельных функций, поэтому от идеи использования библиотеки time отказались), а также потребляемую программой память.

В табл. 2 показаны результаты после выполнения программы обработки ста изображений с библиотекой time.

Таблица 2

Анализ потребления памяти программами

Потребление памяти, Кб	Python	C++
	444164	76020

Закключение В ходе анализа показателей становится ясно, что основное отличие заключается во времени загрузки информации в ней-

ронную сеть и получении информации из нее. Программа на C++ справилась с этими задачами быстрее, из-за чего и суммарное время работы оказалось меньше. Однако загрузка самой нейронной сети в программу осуществляется быстрее, из-за чего при обработке одного изображения программа на Python срабатывает быстрее, чем на C++. Также было замечено, что во время обработки изображений большого размера программа на языке программирования Python заметно подвисала, в то время как программа на C++ такой проблемы не имела.

Таким образом, в ходе исследования мы выяснили, что для работы с массивами изображений на маломощных компьютерах лучше подойдет программа на C++, так как она работает и быстрее, и потребляет меньше памяти, чем программ на Python. Следовательно, такая программа лучше подойдет для реализации различных программ для камер наблюдения и идентифицирующих устройств.

Библиографический список

1. Michael Nielsen. Neural Networks and Deep Learning. – 2017. – URL: <http://neuralnetworksanddeeplearning.com/index.html> (дата обращения: 29.03.2018).
2. Francois Chollet, Deep Learning with Python. – Manning Publications Co, 2018.
3. MobileNets: Efficient Convolutional Neural Networks for Mobile Vision Applications by Google Inc.
4. Краткая история проекта OpenCV. – URL: <https://habrahabr.ru/company/intel/blog/146434/> (дата обращения: 29.03.2018).
5. Самое главное о нейронных сетях. – URL: <https://habrahabr.ru/company/yandex/blog/307260/> (дата обращения: 30.03.2018).

Сведения об авторах

Князев Александр Игоревич – студент Пермского национального 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.

СОДЕРЖАНИЕ

Секция III. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА	3
Баянов Ф.Н., Шулаков Н.В. Перспективы применения цилиндрических линейных вентильных двигателей в нефтедобывающей промышленности	4
Газизов Р.И., Щербинин А.Г. Расчет параметров провисания состыкованных кабелей в вулканизационной камере наклонного типа	10
Гилев Д.В., Ершов С.В. Определение времени вулканизации резиновой изоляции на ротационном реометре DHR-2 ...	15
Жужгов Н.В., Буторин Г.В., Ключников А.Т. Исследование режимов работы синхронного двигателя	20
Зыков А.С., Труфанова Н.М. Численная оценка температурного поля муфтового кабельного соединения и его влияния на пропускную способность кабельной линии	28
Истомин Н.В., Труфанова Н.М. Влияние климатических условий на токовую передаваемую мощность кабелей, проложенных по мосту	32
Кабинова А.И., Щербинин А.Г. Расчёт индуктивностей кабелей с помощью математического моделирования магнитных полей	38
Каменских И.А., Судаков А.И. Новый подход к исследованию и идентификации переходной составляющей в зашумлённых переходных процессах синхронных машин	43
Корюкин Д.Ю., Щербинин А.Г. Математическое моделирование электромагнитных процессов силовых кабелей с токопроводящими жилами секторной формы	49
Лекомцев Е.И. Исследование осесимметричного течения в кабельной головке	55
Ляхомский А.В., Петухов С.В., Шаров Д.О. Прогнозирование электропотребления горного оборудования с использованием искусственной нейронной сети	61
Пашихина А.А., Черняев В.В. Расчет технологического режима изготовления кабеля ВВГЭНГ(а)-LS-0,66кв	67
Передернин И.Ю., Щербинин А.Г. Режим охлаждения полимерной оболочки	72

Поздеева А.С., Субботин Е.В. Оценка срока службы полимерных материалов кабельных ПВХ-пластиков	77
Путилова А.А., Труфанова Н.М. Автоматизация расчёта маршрута волок для волочения проволоки	83
Рябкова Н.А., Казаков А.В. Сравнение методов численной реализации стратифицированных течений	87
Тихомиров А.А., Соболев Н.В. Адаптивное устройство резервирования отказа выключателя	92
Токарев Р.О., Чабанов Е.А. Спектральный анализ неисправностей синхронной машины	97
Турпак А.М., Ключников А.Т., Буторин Г.В. Управление погружным линейным двигателем с учётом положения штока	103
Феофилова Н.В., Кухачрук И.Б., Труфанова Н.М. Расчет теплового поля кабеля с ПВХ-изоляцией	110
Фертиков М.Г., Дятлов И.Я., Труфанова Н.М. Исследование тепловых режимов греющего кабеля различных конструкций	115
Фоминых С.В., Ершов С.В. Определение температуры и времени окислительной индукции полимерных композиций на основе полиэтилена	121
Чесноков Е.А., Тиунов В.В. Тепловые насосы	126
Чирков Д.А., Ключников А.Т., Коротаев А.Д., Тимашев Э.О. Влияние активного сопротивления в частотно-управляемом ЦЛВД	133
Шапошников В.В., Коротаев А.Д. Расчет тягового усилия цилиндрического линейного асинхронного двигателя	139
Бородулина К.В., Труфанова Н.М., Дятлов И.Я. Численный анализ зависимости напряженности электрического поля проводов воздушной линии от параметров расщепления	144
Валинурова З.Ф., Костыгова Т.В. Исследование тепловых процессов эмалирования проволоки на вертикальном эмаль-агрегате	150
Гасанова Я.А., Черняев В.В. Расчет электроснабжения КЦ ГКС-3	155

Готовцева В.А., Бабокин Г.И. Математическая модель скребкового конвейера с безредукторным электроприводом	159
Дятлов И.Я., Труфанова Н.М. Экспериментальное исследование процесса вулканизации	164
Кузнецов А.Н., Щербинин А.Г. Математическое моделирование стационарной задачи теплопроводности силовых кабелей, проложенных в земле	170
Макаров С.Ю., Казаков А.В. Методы изучения старения свойств изоляции	175
Никитин Д.Р., Терлыч А.Е. Экспериментальное исследование параметров системы индукционно-резистивного нагрева	179
Ракова М.В., Тиунов В.В. Расчёт сезонных и часовых вариаций выходной мощности солнечной панели	184
Третьяков М.А., Казаков А.В. Сравнение тепловыделения кабельных жил различной конструкции	190
Тягло А.А., Субботин Е.В. Оценка степени кристалличности полимерных материалов с помощью методов термического анализа	195
Файзуллин А.Э., Труфанова Н.М. Анализ тепловых процессов в нефтяной скважине	199
Хасянова Ю.М., Субботин Е.В. Численное исследование распределения времени пребывания полимера в винтовом канале одношнекового экструдера	205
Шабловский А.С., Терлыч А.Е. Разработка системы индукционного бесконтактного сбора данных от дискретных датчиков	211
Секция IV. ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ	215
Алейников А.Г. Обмен данными по низковольтной дифференциальной цепи питания	216
Алейников А.Г. Узел преобразования сигнала для передачи информации по дифференциальной цепи питания	219
Даденкова А.П., Даденков С.А. Исследование характеристик модели протокола поискового сервиса DHT	223
Норваткин М.И., Тюрин С.А. Обзор и сравнительный анализ технологий LPWAN-сетей	229

Стафеев А.К., Тюрин С.А. Анализ эффективности протоколов маршрутизации в сетях MANET	234
Щербакова В.А., Гаранин А.И., Конин Ю.А. Оптическое разрушение волокна в оптоволоконных линиях связи	239
Белаш Т.В., Фрейман В.И. Разработка и исследование модели инфокоммуникационной системы, использующей арифметическое кодирование	246
Ермилов С.С., Тюрин С.А. Технологии определения местоположения мобильных объектов в беспроводных сетях	253
Клейман Л.А., Фрейман В.И. Система управления и мониторинга точек Wi-Fi-доступа	256
Лихачева Ю.В. Исследование эффективности энергопотребления беспроводных сенсорных сетей в зависимости от протокола маршрутизации	261
Шипицин С.П., Кавалеров М.В. Особенности моделирования городской среды в сетевом симуляторе NS-3	265
Якимова В.А., Фрейман В.И. Исследование и сравнительный анализ технологий MPLS L2 VPN и MPLS L3 VPN	270
Секция V. ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ	275
Погудин А.Л., Зыкин С.А., Баранов С.С. Разработка методики контроля защиты и резервирования информационного и программного обеспечения АСУ ТП	276
Васильев К.П., Филиппов М.А., Шабуров А.С. Угрозы и технологии защиты бесконтактных платежей	282
Митюков Е.А. Практика применения reverse-проху для защиты корпоративных приложений в Интернете	288
Никитин А.С., Кротова Е.Л. Обзор алгоритма квадратичного решета для факторизации целых чисел	293
Осипов Н.Р., Каменских А.Н. Безопасность радиоканала в автосигнализациях	299
Пьянков П.Е., Каменских А.Н. Методика противодействия социальным инженерам	304
Репп П.В. Теоретические аспекты моделирования кибер-атак	309
Садиллов А.В., Гонтовой С.В. О проблемах информационной безопасности, связанных с устранением уязвимостей Meltdown и Spectre	315

Сорокин А.С., Шабуров А.С. Анализ вариантов построения моделей нейронной сети при решении проблемы предотвращения компьютерных атак	322
Субботина П.Д., Кротова Е.Л. Применение технологии блокчейн в инфраструктуре открытых ключей	328
Хиков С.П. Ботнет Mirai как угроза технологии «интернет вещей»	331
Чалин В.А. Способы обнаружения скрытых процессов, связанных с майнингом криптовалют	339
Чегодаев А.А., Каменских А.Н. Принципы и проблемы защиты распределенных баз данных	344
Чураков Р.В., Кокоулин А.Н. Иерархическая система обнаружения вторжений для беспроводных промышленных самоорганизующихся сенсорных сетей	349
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	355

Научное издание

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ
УПРАВЛЕНИЯ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ**

Материалы всероссийской научно-технической
конференции

(г. Пермь, 17 мая 2018 г.)

В двух томах
Том 2

Корректор *И.Н. Жеганина*

Подписано в печать 12.11.2018.
Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 22,8.
Тираж 100 экз. Заказ 245/2018.

Издательство
Пермского национального исследовательского
политехнического университета.
Адрес: 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, к. 113.
Тел. (342) 219-80-33.