

Периодический рецензируемый научно-технический журнал «Электроника и электрооборудование транспорта» является коллективным членом Академии электротехнических наук РФ.

Учредитель и издатель – Научно-производственное предприятие «Томилинский электронный завод».

Журнал включен в перечень изданий, рекомендованных ВАК для апробации кандидатских и докторских диссертаций.

Свидетельство
о регистрации СМИ
ПИ №ФС 77-29963
от 17 октября 2007 г.

Главный редактор:
А.Г. Бабак, к.т.н.

Редакционный совет:

М.П. Бадёр, д.т.н., профессор,
Л.А. Герман, д.т.н., профессор,
В.Н. Дианов, д.т.н., профессор,
Ю.М. Иньков, д.т.н., профессор,
К.Л. Ковалёв, д.т.н., профессор,
А.С. Космодамианский, д.т.н.,
профессор,
А.С. Мазнёв, д.т.н., профессор,
Г.Г. Рябцев, д.т.н., профессор,
В.И. Сарбаев, д.т.н., профессор,
В.Е. Ютт, д.т.н., профессор.

Выпускающий редактор:
Н.А. Климчук.

Редакция:

140070, Московская область,
Люберецкий район, п. Томилино,
ул. Гаршина, д. 11.
Тел./факс: (495) 500-40-20,
(495) 557-21-92
E-mail: npptez@mail.ru
Сайт: www.npptez.ru

Подписано в печать:
___.06.2017 г.

Отпечатано:

ГУП МО «Коломенская типография».
140400, г. Коломна,
ул. III Интернационала, д. 2а.
E-mail: bab40@yandex.ru

Формат 60x90/8,
бумага мелованная, объем 7 п.л.,
тираж 1000 экз., заказ 656

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

Скрипко Л.А.

Расчет степени износа литийионных аккумуляторов, используемых в батарейных системах электромобилей и гибридных автомобилей 2

Шапран Ф.В., Сергеев Б.С.

Идентификация параметров эквивалентной схемы регуляторов напряжения стартер-генераторов тепловозов 5

Сафин А.Р., Ившин И.В., Копылов А.М., Грачева Е.И., Цветков А.Н.

Выбор и оптимизация конструктивных параметров обратимой электрической машины возвратно-поступательного движения 10

Герман Л.А., Субханвердиев К.С.

Расчеты токов короткого замыкания в тяговой сети переменного тока при учете системы внешнего электроснабжения 17

Болнокин В.Е., Нгуен Динь Чунг, Феофанов С.А.

Электронное управление распределенными транспортными процессами с помощью многосерверных систем обработки информации 24

МЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ, ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

Доманов В.И., Доманов А.В., Альтахер Аббас А. Карим

Синтез и анализ работы вычислителя скорости вентильного двигателя 30

ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ, ДАТЧИКИ

Нефедьев А.И., Шаронов Г.И.

Автомобильный многопозиционный датчик положения 33

ПРОБЛЕМЫ КАЧЕСТВА И НАДЕЖНОСТИ, СЕРТИФИКАЦИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ

Козловский В.Н., Новикова А.П.

Анализ подходов и имитационное моделирование при разработке и реализации электротехнической системы мониторинга состояния комплекса электроснабжения беспилотного автомобиля 37

Лисенков А.Н.

Робастное проектирование и многофакторные испытания электротехнических изделий транспорта для обеспечения их качества 41

ИНФОРМАЦИЯ

Краснов Л.А.

О правовых актах, регламентирующих контроль и надзор в сфере правовой охраны и использования результатов интеллектуальной деятельности гражданского, военного, специального и двойного назначения 45

Краснов Л.А.

О предоставлении субсидий российским производителям на финансирование части затрат, связанных с регистрацией на внешних рынках объектов интеллектуальной собственности 46

Краснов Л.А.

Об изменении осуществления государственными заказчиками управления правами Российской Федерации на результаты интеллектуальной деятельности гражданского, военного, специального и двойного назначения 47

Расчет степени износа литийионных аккумуляторов, используемых в батарейных системах электромобилей и гибридных автомобилей

// SOH estimation of EV and HEV lithiumion battery applications //

**Скрипко Л. А., к.т. н.,
ФГУП НАМИ, Москва**

*Статья посвящена проблеме определения степени износа литийионного аккумулятора в процессе эксплуатации электромобиля или гибридного автомобиля. Актуальность создания алгоритма расчета заключается в необходимости контроля степени износа аккумуляторов с целью предотвращения потери производительности транспортного средства и преждевременного выхода из строя дорогостоящих аккумуляторных ячеек. В статье представлены подробное описание алгоритма расчета и полученные результаты для железо-фосфатного аккумулятора емкостью 20 А·ч.
Ключевые слова: электромобили, гибридный автомобиль, фильтр Калмана, литийионная аккумуляторная батарея, расчет степени износа аккумулятора.*

*This paper reports some results relating to a new method of state of health (SOH) estimation for battery-based systems of electro- and hybrid vehicles. Some main challenges were addressed for the accurate estimation of SOH at runtime. Relevance of the problem raised is the need to control the SOH of batteries in order to prevent the reduces of vehicle performance and premature failure of expensive battery cells. Simulation and experiment results show the feasibility and effectiveness of the algorithm for LFP 20 Ah cells.
Keywords: EV, HEV, Kalman filter, lithium battery, state of health calculation.*

В далеком 1925 году Сакити Тоёда, основатель компании Toyota, учредил награду в 1 млн йен за успехи в области исследований и производства литийионных аккумуляторов. Планка была поднята достаточно высоко. Победитель должен был предложить аккумуляторную батарею, обеспечивающую мощность разряда в 75 кВт в течение 24 часов. При этом весить она должна была не более 225 кг. Несложный подсчет показывает, почему спустя 90 лет награда не нашла победителя и, вероятнее всего, найдет еще не скоро. Аккумуляторная батарея Сакити должна иметь плотность энергии около 12 кВтч/кг, то есть превзойти существующие показатели для литийионных аккумуляторов в 60 раз. Такая высокая энергоемкость сравнима с показателями бензина. Подобных революционных инноваций инженеры пока предложить не в силах, но успехи в производстве литийионных аккумуляторов за последние десятилетия хорошо известны. Сегодня пробег даже самого

бюджетного электромобиля, на борту которого установлены литийионные аккумуляторы, может составлять более 150 км. Дорогие модели способны преодолевать 400 км и более. Впечатляющие результаты получены при конструировании самих электромобилей и их электропривода. Например, в июле 2016 года был побит рекорд Гиннеса по энергоэффективному использованию запасаемой энергии аккумулятора. На электромобиле eLi14 за счет использования легких материалов, аэродинамических усовершенствований и высоко-го КПД привода был получен пробег в 1232 км при расходе всего одного киловатт-часа электроэнергии. Имея такие результаты, можно утверждать, что опасения водителей относительно недостатка энергии на борту и ограниченного пробега остаются в прошлом. Хорошей новостью является и то, что период эксплуатации литийионных аккумуляторов также не является актуальной проблемой. Недавно группа

энтузиастов и поклонников марки Tesla собрала информацию о 286 электромобилях, эксплуатируемых во всем мире. Целью исследования было определение периода эксплуатации аккумуляторов и факторов, оказывающих на него влияние. Полученные данные свидетельствуют о том, что в первые 100 000 км пробега аккумуляторы теряют лишь 5% своей емкости. Что еще более примечательно, после этой отметки старение аккумуляторов замедляется. Оценочные расчеты позволяют предположить, что при пробеге до 250 000 км аккумуляторы еще потеряют всего 5% емкости.

Зависимости срока службы аккумуляторов от режима их эксплуатации посвящено множество работ. Например, исследования аккумуляторов Tesla позволили сделать предварительный вывод, что наиболее правильно их заряжать не полностью, а до 90%. При этом полезно периодически использовать станции быстрого подзаряда, то есть заряжать аккумуляторы большой мощностью кратковременно, не давая им разряжаться в поездке полностью. Изучив подобные исследования, можно утверждать, что на сроке службы литийионных аккумуляторов негативно сказывается эксплуатация при их глубоком разряде, работа при низкой температуре, чрезмерный перезаряд, перегрев. На сроке службы также негативно сказывается разряд большими токами. Для северных стран, где электромобили могут использоваться при отрицательных температурах, важно помнить, что заряд литийионных аккумуляторов при температурах ниже нуля приводит к выходу их из строя. Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что заявленный производителем срок службы аккумуляторов сильно зависит от условий эксплуатации электромобиля. Как правило, в документации производителя указано примерное количество циклов заряда/разряда, на которое рассчитан аккумулятор. При этом

цифра дается для строго определенных режимов. Например, для аккумулятора одного из корейских производителей можно найти такие параметры: 3000 циклов при 100% заряде и последующем 100% разряде, при токах заряда/разряда 20 А/40 А и температуре 23°C. Сужая рамки условий эксплуатации, данный производитель указал даже усилие, с которым аккумуляторы должны быть сжаты при компоновке в аккумуляторном модуле. Нетрудно представить, что в условиях реальной эксплуатации электромобиля соблюсти все эти условия практически невозможно. В результате период эксплуатации аккумуляторов можно рассчитать только приблизительно. Поэтому перед инженерами возникает вопрос, как точно определять степень износа аккумуляторов в течение срока их эксплуатации и какие критерии для этого использовать.

В качестве решения этой задачи можно предложить использование зависимости степени износа (SOH – state of health) от внутреннего омического сопротивления аккумулятора. Дело в том, что при деградации аккумулятора его внутреннее сопротивление возрастает. Таким образом, отслеживая сопротивление, можно судить о SOH. Чтобы определить подобную зависимость $SOH = f(R0)$, следует провести так называемое циклирование аккумулятора, которое состоит из большого числа циклов его разряда и заряда. В процессе циклирования фиксируются остаточная емкость аккумулятора и соответствующее внутреннее сопротивление. Как правило, аккумулятор считается пришедшим в негодность, если его емкость составляет 80% от первоначальной. Например, если в начале эксплуатации электромобиля емкость его аккумуляторов составляла 100 А·ч, то при емкости 80 А·ч аккумуляторная батарея подлежит замене.

Возвращаясь к построению зависимости $SOH = f(R0)$, удобно проанализировать зависимость сопротивления $R0$ от температуры и степени заряда аккумулятора. В качестве примера на рис. 1 представлены подобные зависимости для железо-фосфатного аккумулятора емкостью 20 А·ч. Как видно из графиков, при температуре от +20 до +30°C и степени заряда от 30 до 90% сопротивление аккумулятора практически не меняется. Таким образом, если при эксплуатации электромобиля проводить замеры строго при данных условиях, то можно

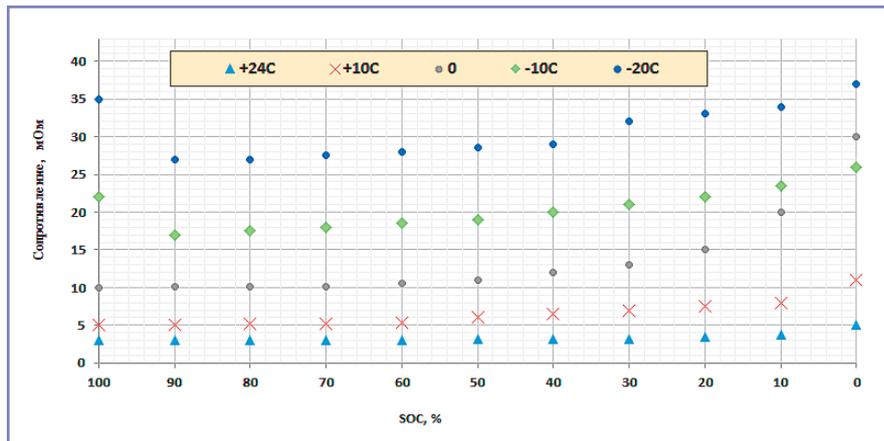


Рис. 1. Зависимость сопротивления аккумулятора от степени заряда и температуры

с большой степенью достоверности судить о текущем сопротивлении аккумуляторов и далее о SOH.

Фактический расчет сопротивления на электромобиле при реализации модели будет осуществляться по выражению

$$RO_{meas} = dU/dI, \quad (1)$$

где RO_{meas} – рассчитанное внутреннее омическое сопротивление аккумулятора, Ом; dU – изменение падения напряжения на аккумуляторе при изменении тока, В; dI – изменение тока нагрузки в момент измерения, А.

Как следует из выражения (1), замер сопротивления должен осуществляться в момент изменения величины тока. Это возможно, например, при резком ускорении электромобиля или при его торможении, когда электродвигатель переключается в генераторный режим. При кажущейся простоте реализация такого алгоритма может вызвать сложности из-за погрешностей датчиков тока и напряжения. Эти погрешности приводят

к тому, что результатом измерений будет не одно верное значение сопротивления, а некий массив данных. В качестве доказательства этого факта можно привести результаты замера сопротивления на испытательном стенде в режиме хаотичного нагрузочного цикла (рис. 2). В данном цикле контур тока нагрузки представлял собой чередование заряда и разряда аккумулятора, а также пауз различной продолжительности, которые могут имитировать остановку электромобиля.

Если проанализировать полученные результаты, то можно заметить, что, несмотря на казалось бы хаотичное распределение величин, существует их некое среднее значение, которое и будет соответствовать действительному сопротивлению аккумулятора в данный момент. Учитывая зависимости сопротивления аккумулятора от степени его заряда (рис. 1), стоит напомнить, что при существенном разряде (SOC < 30%) его сопротивление возрастает существенно, а значит, при составлении

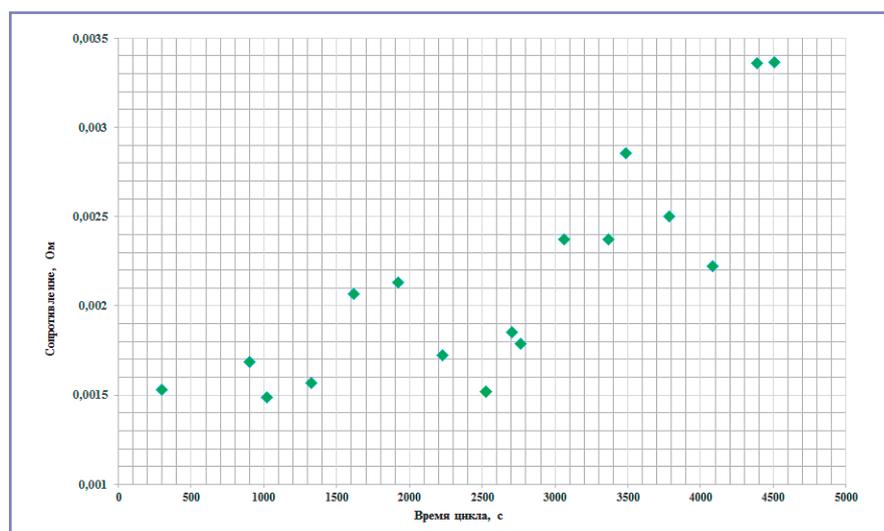


Рис. 2. Результаты измерения сопротивления аккумулятора в ездовом цикле

математической модели расчет в этой области производить нельзя. Представленный на рис. 2 цикл нагрузки соответствовал постепенному разряду аккумулятора. Как видно из графика, после 3000 секунд его сопротивление резко увеличилось. Аккумулятор в данный момент времени разрядился на 70%, что подтверждает, в том числе, работоспособность предложенного метода расчета.

Дальнейшая задача заключалась в определении сопротивления, которое являлось бы математическим ожиданием получаемого разброса значений. Для этого предложен алгоритм вычисления с использованием фильтра Калмана. Алгоритм расчета с использованием фильтра Калмана предусматривает предсказание искомой величины с дальнейшей корректировкой ее значения. Применительно к рассматриваемой системе, каждая итерация состоит из последовательного выполнения нескольких шагов. На первом шаге определяется коэффициент усиления Калмана

$$KG = Eest_{t-1} / (Eest_{t-1} + Emeas), \quad (2)$$

где KG – коэффициент усиления Калмана (Kalman Gain); $Eest_{t-1}$ – ошибка расчета; $Emeas$ – ошибка измерения.

Значение ошибок $Emeas$ и $Eest_{t-1}$ подбираются в ходе исследования для получения наилучшей динамики модели. При этом значение $Emeas$ остается всегда неизменно. К примеру, при стендовых испытаниях для рассматриваемого в статье образца значение погрешности $Emeas$ составило 0,0001.

На втором шаге производится расчет самой искомой величины. В нашем случае это сопротивление аккумулятора. Расчет производится исходя из

предполагаемого значения искомой величины и степени корректировки. За степень корректировки отвечает коэффициент усиления KG . Чем величина KG больше, тем сильнее модель будет реагировать на корректирующий сигнал. Формула расчета сопротивления выглядит следующим образом:

$$RO_t = RO_{t-1} + KG \times [RO_{meas} - RO_{t-1}], \quad (3)$$

где RO_t – значение сопротивления, Ом; RO_{t-1} – значение сопротивления на предыдущем шаге расчета (предполагаемое значение сопротивления), Ом; RO_{meas} – измеренное значение сопротивления по выражению (1).

При первой итерации величину RO_{t-1} можно задать приблизительно соответствующей правильному значению. Например, исходя из информации, представленной на рис. 1, для испытуемого аккумулятора сопротивление допустимо задать равным 0,0025 Ом. Последний этап расчета выполняет корректировку значения $Eest_t$:

$$Eest_t = Eest_{t-1} \times [1-KG]. \quad (4)$$

Последовательное выполнение итераций позволяет получать сопротивление RO_t в виде среднего значения измеряемых величин. На рис. 3 для ранее рассмотренного цикла добавлены значения сопротивлений на выходе фильтра Калмана.

Как следует из информации, представленной на рисунке, полученные значения плавно отслеживают данные измерений, приближаясь в итоге к среднему значению. Еще раз можно подчеркнуть, что с целью предотвращения получения неадекватной информации расчет следует прекратить при разряде аккумулятора

более чем на 70%. Оставшаяся задача системы управления состоит в определении SOH, которая является функцией сопротивления RO . Преимуществом предложенного метода являются, с одной стороны, простота реализации, а с другой стороны – точность получаемых результатов. О важности расчета параметра SOH для электротранспорта говорилось в начальной части статьи.

Литература

1. Kerlau M., Marcinek M., Srinivasan V., Kostecki R. M. Reprint of «Studies of local degradation phenomena in composite cathodes for lithium-ion batteries», *Electrochimica Acta* 53 (2007), p. 1385–1392.
2. Liu P., Wang J., Hicks-Garner J., Sherman E., Soukiazian S., Verbrugge M., Tataria H., Musser J., Finamore P. Ageing Mechanisms of LiFePO₄ Batteries Deduced by Electrochemical and Structural Analyses / *Journal of The Electrochemical Society* 157 (4) (2010), A499–A507.
3. Striebel K. A., Shim J., Cairns E. J., Kostecki R., Lee Y. J., Reimer J., Richardson T. J., Rossm P. N., Song X., Zhuang G. V. Diagnostic Analysis of Electrodes from High-Power lithium-Ion Cells Cycled under Different Conditions / *Journal of The Electrochemical Society* 151 (6) (2004), A857–A866.
4. Sethuraman V. A., Hardwick L. J., Srinivasan V., Kostecki R. Surface structural disordering in graphite upon lithium intercalation/deintercalation / *Journal of Power Sources* 195 (2010), p. 3655–3660.
5. Sarre G., Blanchard Ph., Broussely M. Aging of lithium-ion batteries / *Journal of Power Sources* 127 (2004), p. 65–71.
6. Shikano M., Kobayashi H., Koike S., Sakaebe H., Ikenaga E., Kobayashi K., Tatsumi K. Investigation of positive electrodes after cycle testing of high-power Li-ion battery cells II. An approach to the power fading mechanism using hard X-ray photoemission spectroscopy / *Journal of Power Sources* 174 (2007), p. 795–799.
7. Belt J. R., Ho C. D., Motloch C. G., Miller T. J., Duong T. Q. A capacity and power fade study of Li-ion cells during life cycle testing / *Journal of Power Sources* 123 (2003), p. 241–246.
8. du Pasquier A., Blyr A., Cressent A., Lenain C., Amatucci G. An update on the high temperature ageing mechanism in LiMn₂O₄-based Li-ion cells / *Journal of Power Sources* 81–82 (1999), p. 54–59.

Скрипко Леонид Александрович

Родился в 1976 году. Окончил МАДИ по специальности «Электрооборудование автомобилей и тракторов». Кандидат технических наук. В 2000 году защитил диссертацию по теме «Комбинированные энергоустановки электроавтомобилей». Опыт работы – более 15 лет. В настоящее время работает ведущим инженером в ФГУП НАМИ. Автор Патента № 166471 «Схема гибридного привода автомобиля».

Skripko Leonid

Was born in 1976. He graduated from Moscow Automobile and Road Construction State Technical University majoring in «Electric equipment of automobiles and tractors». He is Candidate of Technical Sciences. In 2000 he defended the thesis, the subject is «Combined electric plants of automobiles». He has more than 15 years of work experience. At present he works as Senior Engineer at State Research Center of the Russian Federation. He is author of patent no.166471. The scheme of Hybrid drive of automobile.

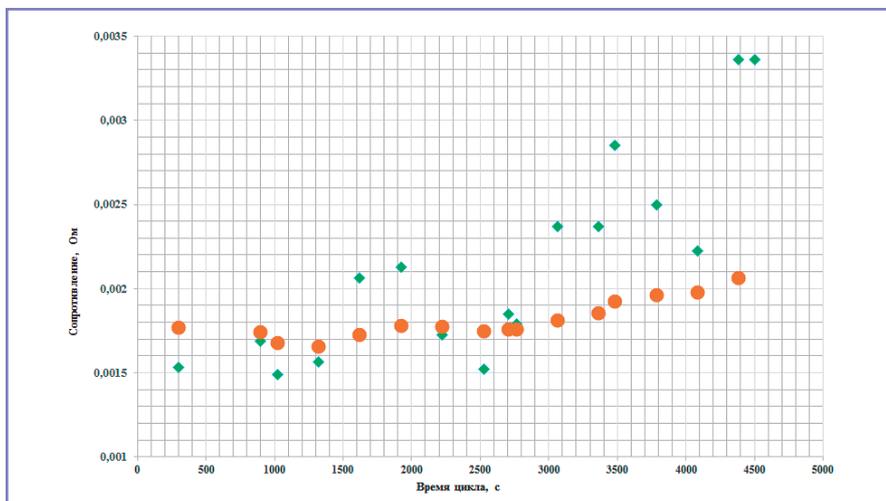


Рис. 3. Расчет сопротивления при использовании фильтра Калмана

Идентификация параметров эквивалентной схемы регуляторов напряжения стартер-генераторов тепловозов

// Model identification for voltage regulator of diesel locomotive starter-generator //

Шапран Ф. В.,
ООО «Горизонт», Екатеринбург
Сергеев Б. С., д.т. н., профессор,
УрГУПС, Екатеринбург

В статье представлена эквивалентная схема регулятора напряжения стартер-генератора тепловоза с учетом реальных особенностей монтажных соединений, позволяющая проанализировать режим работы регулятора напряжения в составе оборудования тепловоза. На основе разработанной эквивалентной схемы выявлены механизмы отказов элементов регулятора напряжения и представлены конструктивные решения, позволяющие повысить надежность и улучшить электромагнитную совместимость тепловозов.

Ключевые слова: полупроводниковый преобразователь электроэнергии, понижающий преобразователь напряжения, регулятор напряжения, стартер-генератор, электромагнитная совместимость.

Регулятор напряжения (РН) стартер-генератора (СГ) тепловоза осуществляет стабилизацию в заданных пределах выходного напряжения стартер-генератора в генераторном режиме при изменениях в широких пределах его частоты вращения и нагрузки [1]. Для повышения эксплуатационной надежности РН в разное время предлагались решения в виде дополнительных устройств, ограничивающих, в частности, импульсные перенапряжения на элементах РН (например, [2]), но проблема и в настоящее время остается актуальной, что указывает на системный характер ее причин.

Для решения поставленной задачи необходимо выявить характер процессов, приводящих к отказам силовых ключей РН, и определить количественные параметры этих процессов, то есть идентифицировать параметры эквивалентной схемы функционирования РН в составе оборудования тепловоза.

This paper proposes a model of voltage regulator of starter-generator of diesel locomotive taking electrical assemblies into account which let us analyze the working modes of voltage regulator with diesel locomotive equipment. Failure modes of voltage regulator elements were revealed and design decisions of reliability and electromagnetic compatibility enhancement were defined by the model.

Keywords: power converter, step-down converter, voltage regulator, starter-generator, electromagnetic compatibility.

Анализ эксплуатационных документов различных РН, электрических принципиальных схем тепловозов

и литературы [1, 3] показывает идентичность решений силовой части РН тепловозов. Стабилизация выходного напряжения СГ осуществляется соответствующим управлением током обмотки возбуждения (ОВ) СГ, заключающимся в циклах включения и выключения транзисторного ключа S , как показано на рис. 1. При включенном ключе S питание подается на ОВ, что увеличивает ток ОВ и выходное напряжение СГ. После выключения ключа S ток обмотки ОВ снижается, протекая через диод $VD2$ [1]. Изменение отношения времен включения и выключения ключа S изменяет средний ток ОВ и выходное напряжение СГ.

Контакты РН на рис. 1 условно не показаны, и в этой статье не рассматривается их влияние на надежность функционирования РН.

В основном электромагнитные процессы в схеме, показанной на рис. 1, идентичны процессам преобразования электроэнергии в импульсном стабилизаторе постоянного напряжения понижающего типа (ПН) [4]. Отличия рассматриваемой схемы (рис. 1) от схемы ПН заключаются в том, что силовой ключ S

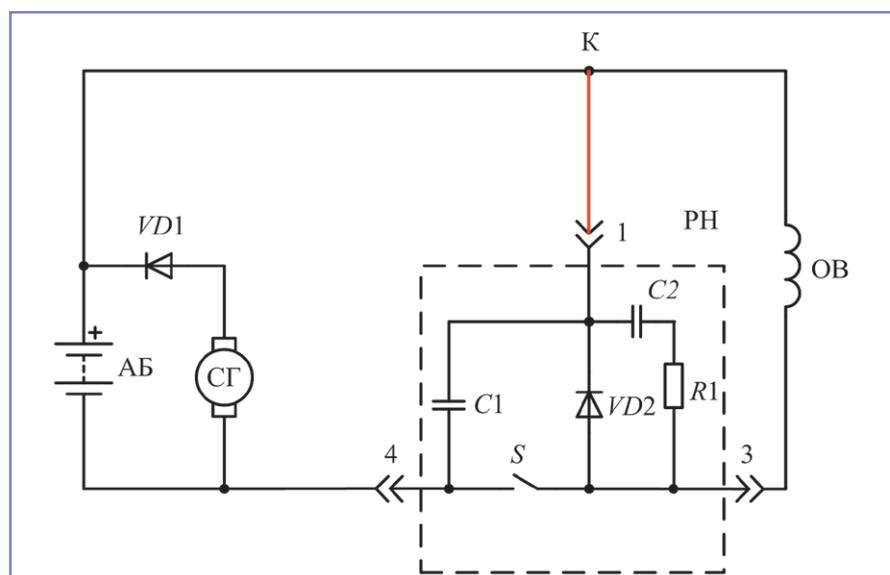


Рис. 1. Схема силовой части РН

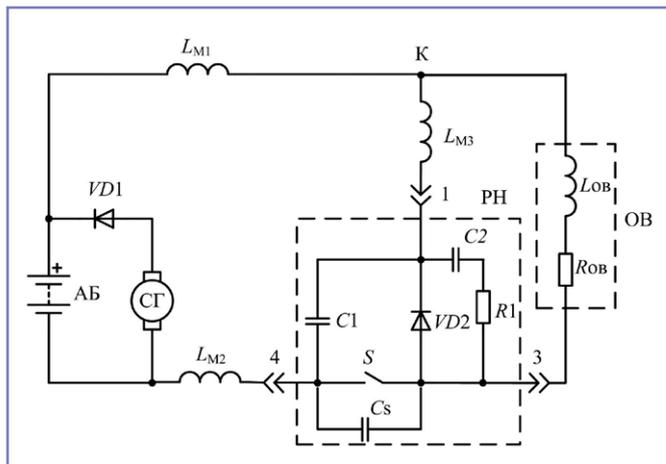


Рис. 2. Эквивалентная схема РН с учетом наличия паразитных элементов

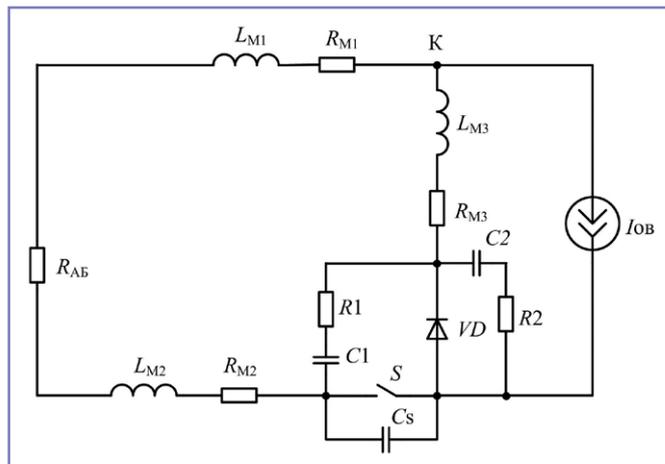


Рис. 3. Модифицированная эквивалентная схема РН

подключен к отрицательному выводу источника входного напряжения. В качестве эквивалента нагрузки ПН выступает активное сопротивление обмотки возбуждения, отсутствует обычная для классической схемы ПН выходная емкость, подключаемая параллельно нагрузке.

С точки зрения рассматриваемой в этой работе проблемы существенным отличием является конструктивно распределенный характер схемы, так как РН, ОВ и СГ удалены друг от друга на расстояние до нескольких метров.

На рис. 2 показана эквивалентная схема РН, учитывающая следующие конструктивные паразитные элементы: L_{M1} – L_{M3} – индуктивности монтажа соединительных линий, C_S – выходная емкость силового ключа S , L_{OB} – индуктивность ОВ, R_{OB} – активное сопротивление ОВ. Пунктирной линией показана условная граница корпуса РН, определяющая трехполюсный способ подключения РН к ОВ и СГ.

Индуктивности L_{M3} (рис. 2) соответствует выделенный красным цветом на рис. 1 проводник между контактом 1 РН и узлом К. По этому проводнику после завершения переходного процесса выключения ключа S протекает ток ОВ.

На рис. 2 можно увидеть, что на этапе включенного состояния ключа S индуктивность L_{M3} не оказывает влияния на работу РН. В момент выключения ключа S электромагнитные процессы имеют существенные отличия от традиционных схем. Величина тока в индуктивности монтажа L_{M3} в момент размыкания ключа S равна нулю и препятствует протеканию тока ОВ через диод $VD2$, что обуславливает появление импульса ЭДС самоиндукции ОВ. Амплитуда этого

импульса $U_{ИМП}$ зависит от скорости за-
пирирования силового ключа S , эффектив-
ной выходной емкости C_S ключа S ,
паразитных емкостей ОВ и монтажа.
Максимальное напряжение на силовом
ключе U_S складывается из постоянного
напряжения аккумуляторной батареи
 U_{AB} и амплитуды импульса перенапря-
жения $U_{ИМП}$.

Нормированные усредненные значения эффективной емкости полупроводникового прибора, использующейся в качестве силового ключа в РН, ориентировочно составляют 1 нФ, что недостаточно для снижения амплитуды импульса перенапряжения до допустимых пределов. Увеличение этой емкости, реализуемое путем подключения внешних конденсаторов параллельно силовому ключу S , приводит к повышению средней мощности потерь в ключе и значительному увеличению максимального значения мгновенной мощности на этапе его включения. При этом повышается температура и снижается ресурс силового ключа. Топология схемы такова, что любой способ подключения внешнего шунтирующего диода, замыкающего цепь тока ОВ, также неэффективен из-за наличия монтажных индуктивностей.

Для снижения амплитуды перенапряжения на силовом ключе $U_{ИМП}$ в момент его закрытия в состав РН включают демпфирующую емкость, как, например, $C1$ и $C2$ на рис. 2.

Для определения амплитуды импульса перенапряжения $U_{ИМП}$ на ключе S выполним дальнейшую модификацию схемы.

В схеме, показанной на рис. 3, АБ, СГ и $VD1$ представлены эквивалентным сопротивлением R_{AB} . В схему также

включены активные сопротивления монтажных кабелей R_{M1} – R_{M3} и эквивалентное последовательное сопротивление $R1$ конденсатора $C1$.

Измерение фактической индуктивности провода L_{M3} и ее расчет для сечения 4 мм^2 (эффективный радиус $r = 1,13 \text{ мм}^2$) и длины проводника l , в среднем составляющей 5 м, можно определить из выражения [5]

$$L_{M3} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{r} - \frac{3}{4} \right),$$

что дает значение $L_{M3} = 9 \text{ мкГн}$.

Величина индуктивности ОВ составляет 0,2 Гн, что на четыре порядка больше, чем индуктивность L_{M3} . Такое соотношение индуктивностей позволяет упростить анализ путем замены индуктивности L_{OB} генератором тока I_{OB} , показанного на рис. 3. Величина I_{OB} равна току обмотки возбуждения в момент выключения ключа S . В соответствии с [6] примем, что значение тока генератора равно максимально допустимой величине для СГ и составляет 20 А.

В момент размыкания ключа S (рис. 3) ток индуктивностей L_{M1} и L_{M2} равен току I_{OB} . Амплитуда перенапряжения определяется выражением

$$U_{ИМП} = \frac{1}{C1 + C_S} \int_{t_1}^{t_2} I_{OB}(t) dt, \quad (1)$$

где t_1 – время начала размыкания ключа S , t_2 – время, когда ток индуктивности L_{M3} достигает значения I_{OB} .

Приведя потери в монтажных кабелях к одному сопротивлению R_L и сгруппировав емкости $C1$ и C_S в одну демпфирующую емкость $C_{д'}$ получим эквивалентную схему для расчета амплитуды импульса напряжения на $C_{д'}$

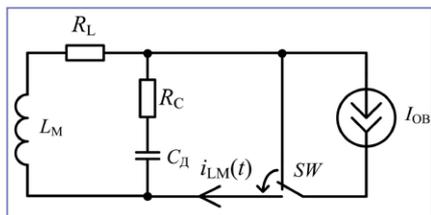


Рис. 4. Схема для расчета напряжения на силовом ключе РН

и напряжения на силовом ключе РН, показанную на рис. 4.

Ключ SW в схеме на рис. 4 выполняет коммутации, соответствующие ключу S и диоду VD на рис. 3. Значение индуктивности L_M для времени начала выключения ключа S соответствует индуктивности L_{M3} .

Определив времена t_1 и t_2 в выражении (1) через параметры схемы, изображенной на рис. 4, при однократном срабатывании ключа SW и равных нулю сопротивлений R_L и R_C , получим выражение амплитуды перенапряжения $U_{ИМП}$, которое будет являться функцией характеристического сопротивления контура и тока $I_{ОВ}$:

$$U_{ИМП} = I_{ОВ} \sqrt{\frac{L_M}{C_D}}. \quad (2)$$

При $U_{AB} = 110$ В; $I_{ОВ} = 20$ А; $L_M = 9$ мкГн и $C_D = 20$ мкФ значение U_S составляет 123 В. Временная деградация емкости электролитического конденсатора $C1$ приведет к увеличению максимального напряжения на силовом ключе. Так, при уменьшении емкости $C1$ в 10 раз по сравнению с номинальной, U_S будет иметь уровень 152 В. При отказе емкости $C1$ и наличии в контуре только эффективной выходной емкости ключа C_S , если она равна 1 нФ, расчетное максимальное напряжение на силовом ключе U_S составит около 2 кВ.

В установившемся режиме РН в результате коммутаций ключа SW на контур $L_M C_D$ периодически подаются импульсы тока величиной $I_{ОВ}$, определяющие стационарную амплитуду импульсов напряжения на силовом ключе U_S^* . В работе [7] показана зависимость стационарной амплитуды напряжения на элементах колебательного контура, к которому прикладываются импульсы напряжения малой длительности, от кратности периода колебательного контура к периоду импульсов напряжения. В случае приложения импульсов тока малой длительности получим

выражение для стационарной амплитуды напряжения контура $L_M C_D$:

$$U_S^* = \frac{I_{ОВ} \sqrt{\frac{L_M}{C_D}}}{1 - e^{-md}}. \quad (3)$$

Переменная $m = T_{ИМП} / T_0$ – это кратность периода импульсов тока $I_{ОВ}$ по отношению к собственному периоду колебаний контура $C_D L_M$; d – декремент затухания. При длительности импульсов тока $I_{ОВ}$, сравнимой с длительностью периода T_0 , для определения величины стационарной амплитуды U_S^* требуется совместный учет времен включения и выключения ключа S .

Стационарная амплитуда напряжения на демпфирующем конденсаторе C_D определяет действующее значение тока конденсатора. В качестве примера влияния кратности m на величину действующего тока на рис. 5 показаны результаты схемотехнического моделирования: графики зависимости тока конденсатора C_D от времени, начиная с первого импульса тока ($I_{ОВ} = 20$ А), при следующих параметрах элементов контура $L_M C_D$: $L_M = 9$ мкГн; $C_D = 20$ мкФ; $R_L = 23$ мОм; $R_C = 1$ мОм. Значение R_L соответствует сопротивлению провода сечением 2,5 мм² длиной 5 м [8]. Значение R_C соответствует среднему значению эквивалентного последовательного сопротивления современных электролитических конденсаторов с номинальной емкостью 20 мкФ и допустимым напряжением 250 В.

При периоде следования возбуждающих импульсов тока $T_{ИМП}$ равном 1/850 с, действующее значение тока конденсатора C_D равно 7 А. Если изменить период $T_{ИМП}$ до 1/930 с, то действующее значение тока увеличится до 22 А, что значительно снижает расчетную [9] и фактическую наработку на отказ

демпфирующих конденсаторов, отказ которых, как указывалось ранее, приводит к отказу силовых ключей РН. Кратность периодов импульсов m составляет 12,75 и 14.

Рассмотренный режим резонансно-го увеличения стационарной амплитуды импульсов U_S^* возникает как при широтно-импульсном управлении силовым ключом РН на постоянной частоте, так и при релейном способе управления силовым ключом на переменной частоте. В первом случае кратность m может принимать целые значения из-за временных изменений параметров контура $L_M C_D$. Во втором случае это происходит в процессе стабилизации выходного напряжения СГ при некоторых соотношениях тока нагрузки СГ и параметров схемы управления РН.

Действующее значение тока конденсатора определяет его эксплуатационный ресурс. Представленный анализ электрического режима работы демпфирующих конденсаторов указывает на возможную необходимость пересмотра сроков замены электролитических конденсаторов при плано-предупредительных ремонтах эксплуатируемых РН.

Индуктивность контура $L_M C_D$ является эффективным излучателем радиопомех, что совместно с высоким уровнем резонансных токов становится одной из причин нарушения электромагнитной совместимости (ЭМС) оборудования тепловоза. Способ прокладки проводов контура $L_M C_D$ в корпусе тепловоза обычно требует согласования с разработчиками РН и специалистами по ЭМС.

Из выражений (2) и (3) следует, что при уменьшении величины индуктивности L_{M3} снижаются амплитуда перенапряжения $U_{ИМП}$ и стационарная амплитуда перенапряжения U_S^* . На рис. 6 показана возможность уменьшения

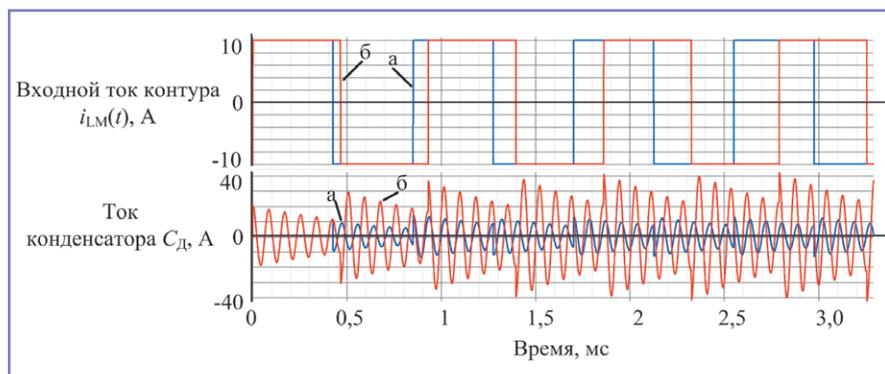


Рис. 5. Зависимость тока конденсатора C_D от времени при периоде импульсов генератора: а) $T_{ИМП} = 850$ Гц; б) $T_{ИМП} = 930$ Гц

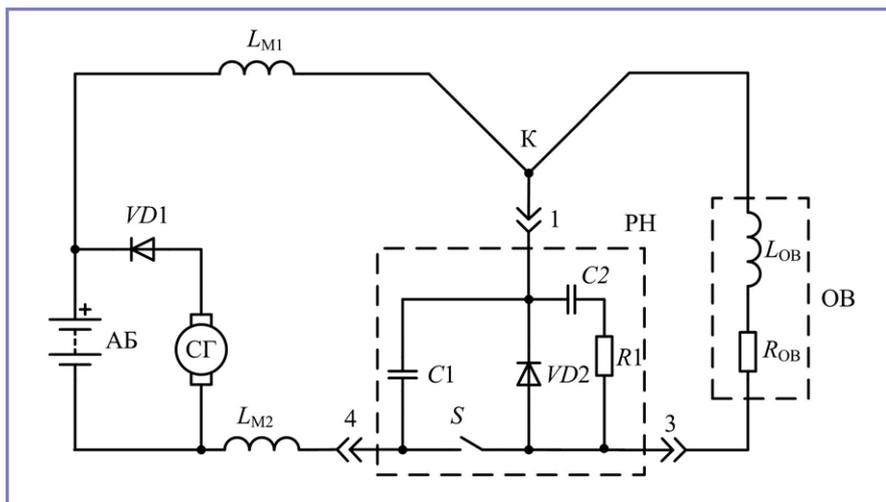


Рис. 6. Подключение РН со сниженной индуктивностью монтажа L_{M3}

величины индуктивности L_{M3} путем оптимальной прокладки проводов: узел К максимально близко расположен к РН.

Дальнейший анализ показывает, что в установившемся режиме работы РН (в отличие от однократного в схеме, показанной на рис. 4) индуктивность L_M включает в себя все три монтажные индуктивности $L_{M1}-L_{M3}$, что несколько снижает эффективность решения, показанного на рис. 6, для повышения эксплуатационной надежности РН. В такой схеме более эффективным решением будет включение полупроводникового диода в провод с индуктивностью L_{M3} , исключая резонансный увеличение амплитуды импульсов перенапряжения. В свою очередь, решение с диодом подходит не для всех типов РН, поскольку обычно вывод 1 РН (рис. 6) рассматривается как вывод питания схемы управления РН, а не как вывод, обеспечивающий непрерывное протекание тока ОВ при выключении силового ключа S.

При расчете РН и проектировании схем подключения РН следует воспользоваться подходами, классическими для силовой электроники, что приводит к схеме на рис. 7, где РН подключен к оборудованию тепловоза как ПН – по четырехполюсной схеме: узел К расположен внутри корпуса РН. При этом емкость C1 входит в состав входного фильтра. В схеме на рис. 7 условно не показаны необходимые здесь индуктивные элементы входного и выходного фильтров.

Показанный на рис. 7 способ подключения РН позволяет устранить свойственную трехполюсной схеме включения РН неопределенность

идентификации проводов и входных и выходных кабелей. В четырехполюсной схеме прямой и обратный провод по входу или выходу РН необходимо прокладывать в одном кабеле, что значительно снизит эмиссию радиопомех за счет уменьшения площади контура излучения и уменьшения эффективной индуктивности проводов [10].

Выводы

Распределенный характер системы управления током обмотки возбуждения стартер-генератора при трехполюсном подключении регулятора напряжения приводит к включению в схему преобразования электроэнергии монтажных индуктивностей, вызывающих резонансные явления, что значительно повышает электрические нагрузки элементов и способствует ускорению их деградации с последующим отказом.

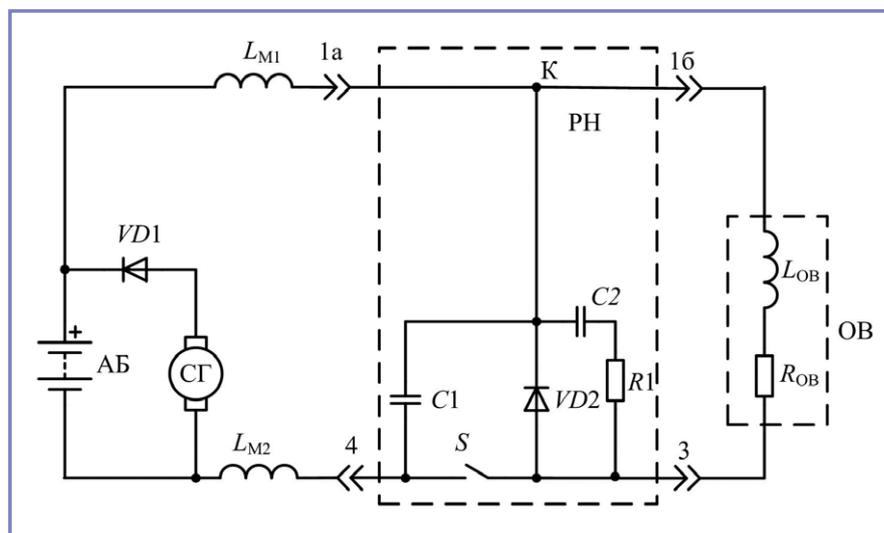


Рис. 7. Подключение РН к электрооборудованию тепловоза в виде четырехполюсника

Изменение способа подключения регулятора напряжения на четырехполюсный, включение в его схему входного фильтра и элементов демпфирования паразитных резонансов позволяют повысить надежность и улучшить электромагнитную совместимость оборудования тепловозов.

Наиболее радикальным методом обеспечения надежной работы регулятора напряжения является полная конструктивная переработка монтажа силовых соединительных элементов и расположения полупроводниковых приборов. Однако проведенный в настоящей статье анализ и предложенные практические меры позволяют повысить ресурс работоспособности регуляторов напряжения, находящихся в эксплуатации.

Литература

1. Филонов С.П., Гибалов А. И., Быковский В. Е. и др. Тепловоз 2ТЭ116. – 2 изд. – М.: Транспорт, 1985. – 330 с.
2. Устройство для ограничения напряжения в цепях полупроводникового регулятора тока: заявка 94033131/11 Рос. Федерация: МПК В 60 L 3/04 / Новиков О. И.; заявитель – Уральское отделение Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта; заявл. 13.09.94; опубл. 27.08.96.
3. Быков В.Г., Морозкин Б. Н., Серделевич Г. Е. и др. Пассажирский тепловоз ТЭП 70. – М.: Транспорт, 1976. – 235 с.
4. Сергеев Б.С., Чечулина А. Н. Источники электропитания электронной аппаратуры железнодорожного транспорта. – М.: Транспорт, 1998. – 280 с.

5. Калантаров П.Л., Цейтлин Л. А. Расчет индуктивностей. Справочная книга. 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.
6. Стартер-генератор 5 СГ. Технические условия ТУ 16-05810695-041-98. Дата введения: 31.07.2000.
7. Горелик Г. С. Колебания и волны. Введение в акустику, радиофизику и оптику. 3-е изд. / Под ред. С. М. Рытова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 656 с.
8. Белоруссов Н.И., Саакян А. Е., Яковлева А. И. Электрические кабели, провода и шнуры. Справочник / Под ред. Н. И. Белоруссова. 5 изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 540 с.
9. Рентюк В. Зависимость времени наработки на отказ электролитических конденсаторов от реальных условий эксплуатации // Вестник электроники. 2014. № 3. С. 32–38.
10. Шваб А. Электромагнитная совместимость. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 469 с.

Шапран Федор Валерьевич

Родился в 1972 году. В 1999 году окончил Уральский государственный технический университет (УГТУ-УПИ) по специальности «Радиотехника». Опыт разработки полупроводниковых преобразователей электроэнергии для ОАО «РЖД» – 18 лет. В настоящее время работает инженером в ООО «Горизонт», обучается в аспирантуре Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС). Имеет 2 публикации и 2 патента.

Сергеев Борис Сергеевич

Родился в 1941 году. В 1964 году закончил Уральский электромеханический институт инженеров транспорта. Доктор технических наук, профессор. В 1993 году защитил докторскую диссертацию по теме «Силовая электроника». Опыт работы – 53 года. В настоящее время работает профессором кафедры «Электрические машины» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС). Имеет 190 публикаций, включая 4 монографии, 130 авторских свидетельств и патентов.

Shapran Fedor

Was born in 1972. In 1999 he graduated from Ural State Technical University majoring in «Radio engineering». He has 18 years' experience of semiconducting power converters development for Russian Railways. At present he is an engineer at Gorizont Limited and he is a post-graduate student at Ural State University of Railway Transport (USURT). He has 2 publications and 2 patents.

Sergeev Boris

Was born in 1941. In 1964 he graduated from the Ural Electromechanical Railway Engineering Institute. He is Doctor of Technical sciences, professor. In 1993 he defended doctorate thesis, the subject of dissertation is «Power electronics». He has 53 years of work experience. At present he works as professor of «Electric machines» department of Ural State University of Railway Transport. He has 190 publications, including 4 monographs, 130 certificates of authorships and patents.

Выбор и оптимизация конструктивных параметров обратимой электрической машины возвратно-поступательного движения

// Selection and optimization of design parameters for reversible reciprocating electric machine //

Сафин А. Р., к.т.н., доцент,
Ившин И. В., д.т.н., профессор,
Копылов А. М., Грачева Е. И., д.т.н., доцент,
Цветков А. Н., к.т.н.,
КГЭУ, г. Казань

В статье представлена методика выбора и обоснования конструктивных параметров обратимой электрической машины возвратно-поступательного движения в режиме генератора и двигателя. Целью исследования является расчет рациональных параметров электрической машины для обеспечения максимально возможной энергетической эффективности с учетом заданных условий. Предложена концепция параллельного моделирования (Co-Simulation) на основе обмена данными между программами MATLAB Simulink и CATIA V5 с помощью специально написанной программы. Концепция дает возможность производить обмен данными между обозначенными программами с целью повышения эффективности, точности моделирования и оптимизации конструктивных размеров деталей. Данные значения закладываются в 3D-модели линейной электрической машины в САПР CATIA V5 для последующих кинематического и прочностного расчетов. Данные моделирования в программном комплексе MATLAB Simulink на основе программ, написанных на языке MATLAB, передаются в проектную таблицу Excel, которая синхронизируется с САПР CATIA V5. В CATIA V5 строятся 3D-модели статора и транслятора электрической машины. Разработанная методика позволяет на стадии проектирования определить рациональные параметры электрической машины с последующей отладкой при изготовлении экспериментального образца. **Ключевые слова:** электрическая машина возвратно-поступательного движения, имитационное моделирование, трехмерное моделирование, оптимизация, энергетическая эффективность.

*The article presents the technique of design parameters choice and substantiation for a reversible electric machine with reciprocating motion in the engine and generator mode. The aim of the study is to calculate the rational parameters of an electric machine to ensure maximum energy efficiency taking into account the given conditions. The concept of parallel simulation (Co-Simulation) is proposed. The concept is based on the data exchange between the programs MATLAB Simulink, CATIA V5 and a special program. The concept makes it possible to exchange the data between the marked programs to improve the efficiency, accuracy, simulation and optimization of the parts structural dimensions. These values are placed in a 3D model of a linear electric machine in CAD CATIA V5 for later kinematic and strength calculation. The modeling data in the software package MATLAB Simulink based on the programs written in MATLAB are transferred to the project table Excel, which is synchronized with the CAD CATIA V5. CATIA V5 develops 3D models of an electric machine stator and translator. The developed method allows to determine the rational parameters of an electrical machine during a design stage, followed by an adjustment during the manufacture of an experimental sample. **Keywords:** reciprocating electric machine, simulation, three-dimensional modeling, optimization, energy efficiency.*

Энергетическая стратегия России на период до 2030 года направлена на развитие малой энергетики, что предоставляет возможности широкого применения мобильных и стационарных энергоустановок мощностью до 100 кВт на базе двигателей внутреннего сгорания, которые производят электроэнергию для сверхмалых одиночных потребителей [3, 7, 8, 9, 10].

В качестве электромеханического преобразователя энергии в таких энергоустановках оптимально использовать обратимую электрическую машину возвратно-поступательного действия, построенную по модульному принципу (рис. 1) [1, 2]. Это позволит масштабировать энергоустановку по мощности для конкретной задачи. На рис. 1 представлен общий вид разрабатываемой электрической машины возвратно-поступательного действия, который был определен на основе предварительного патентного анализа [6].

Аналитический анализ отобранных в результате патентного исследования опубликованных охраняемых документов позволил выявить достоинства и недостатки различных конструктивных решений обратимой электрической машины возвратно-поступательного действия. Наиболее рациональной формой реализации обратимой электрической машины возвратно-поступательного действия является цилиндрическая конструкция с постоянными магнитами на подвижном якоре. Конструктивно целесообразно выполнять якорь полым, с поверхностно монтируемыми магнитами, формирующими радиальный магнитный поток. Выбранная форма реализации обеспечит наилучшие технико-экономические характеристики обратимой электрической машины возвратно-поступательного действия.

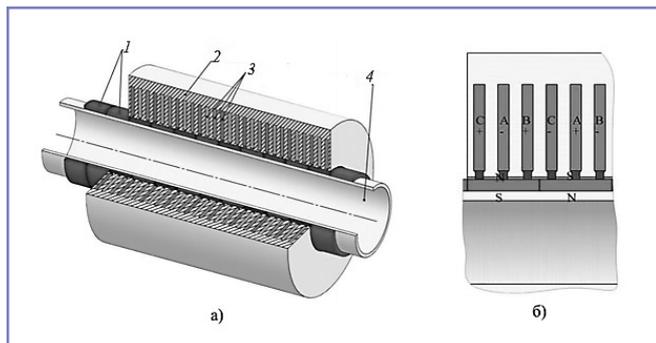


Рис. 1. Структура электрической машины возвратно-поступательного действия с радиально-намагниченными магнитами на подвижном элементе:

а) общий вид: 1 – кольцевой постоянный магнит, 2 – ядро статора, 3 – фазные обмотки, 4 – немагнитная труба (титан);
б) схема фаз и полярности постоянных магнитов

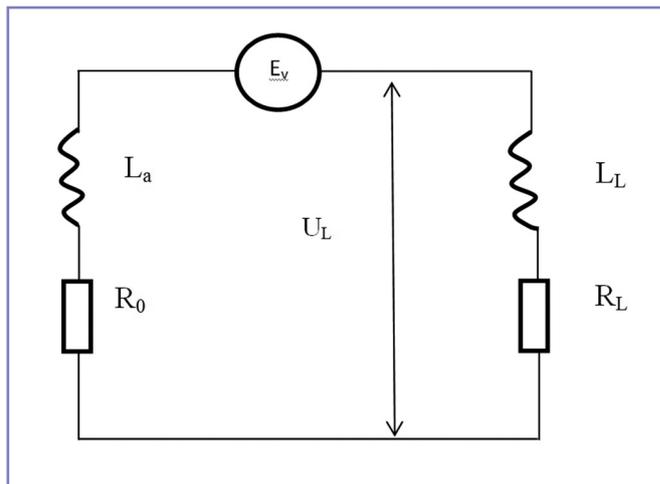


Рис. 2. Эквивалентная схема

Методика выбора и обоснования конструктивных параметров обратной электрической машины возвратно-поступательного движения

С целью определения рациональных конструктивных параметров электрической машины возвратно-поступательного движения предлагается реализовать концепцию параллельного моделирования (в иностранной литературе Co-Simulation) [11, 12, 16].

Данная концепция дает возможность производить обмен данными между различными программами с целью повышения эффективности, точности моделирования и оптимизации конструктивных размеров деталей. В нашем случае предлагается производить обмен данными между программами MATLAB Simulink и CATIA V5 через специально написанную оригинальную программу.

Разработка и оптимизация электрической машины возвратно-поступательного действия должны проводиться вместе с расчетом параметров преобразователя, линейная машина и преобразователь должны рассматриваться как единая система [13, 17, 19].

В качестве среды имитационного моделирования электрической машины возвратно-поступательного действия, полупроводникового преобразователя и системы управления выбраны программный комплекс MATLAB Simulink и библиотека блоков SimPowerSystems, которая является одной из множества дополнительных библиотек Simulink, ориентированных на моделирование электротехнических устройств. SimPowerSystems содержит набор блоков для имитацион-

ного моделирования электротехнических устройств.

Кроме того, в модели с использованием блоков SimPowerSystems можно применять блоки и остальных библиотек Simulink, а также функции самого MATLAB, в том числе блок оптимизации Optimization Toolbox, что дает практически неограниченные возможности для моделирования электротехнических систем [5].

Таким образом, SimPowerSystems в составе Simulink на настоящее время может считаться одним из лучших пакетов для моделирования электротехнических устройств и систем [14, 21].

Для трехмерного моделирования, прочностного и кинематического анализа деталей электрической машины выбран программный продукт CATIA V5 – комплексная система автоматизированного проектирования (CAD), технологической подготовки производства (CAM) и инженерного анализа (CAE), включающая в себя передовой инструментарий трехмерного моделирования, подсистемы программной имитации сложных технологических процессов, развитые средства анализа и единую базу данных текстовой и графической информации [20].

Моделирование и исследование работы трехфазной электрической машины возвратно-поступательного движения на выпрямительную нагрузку

В интегрированной среде создания инженерных приложений Simulink системы MATLAB 2010 смоделированы и исследованы различные виды работы

обратимой электрической машины возвратно-поступательного действия.

Внешние возмущающие механические колебания, действующие на обратимые электрические машины возвратно-поступательного действия, зачастую носят нестабильный характер. Поэтому целесообразна работа обратимых электрических машин возвратно-поступательного действия на выпрямительную нагрузку с последующим аккумулированием энергии.

Эквивалентная схема представлена на рис. 2, где L_a, R_0 – индуктивность и активное сопротивление рабочей обмотки; L_L, R_L – индуктивность и активное сопротивление нагрузки с учетом сопротивления выпрямителя; E_v – ЭДС движения, наводимая в рабочей обмотке при перемещении магнитов [4].

Движение магнитов будет подчиняться закономерности

$$x = x_m \sin \omega t, \quad (1)$$

где x_m – амплитуда движения магнитов; ω – круговая частота перемещения магнитов.

ЭДС движения E_v описывается выражением

$$E_v = C_{MW} \frac{dx}{dt} = C_{mw} x_m \omega \cos \omega t, \quad (2)$$

где C_{MW} – коэффициент электромагнитной силы

$$C_{MW} = k_{MW} \frac{2\mu_0 l F_{MW}}{\pi k_{\mu a}}, \quad (3)$$

где k_{MW} – коэффициент линеаризации электромагнитной силы;

μ_0 – магнитная проницаемость вакуума $4\pi \cdot 10^{-7}$;

l – длина окружности диаметра магнита D_M ;

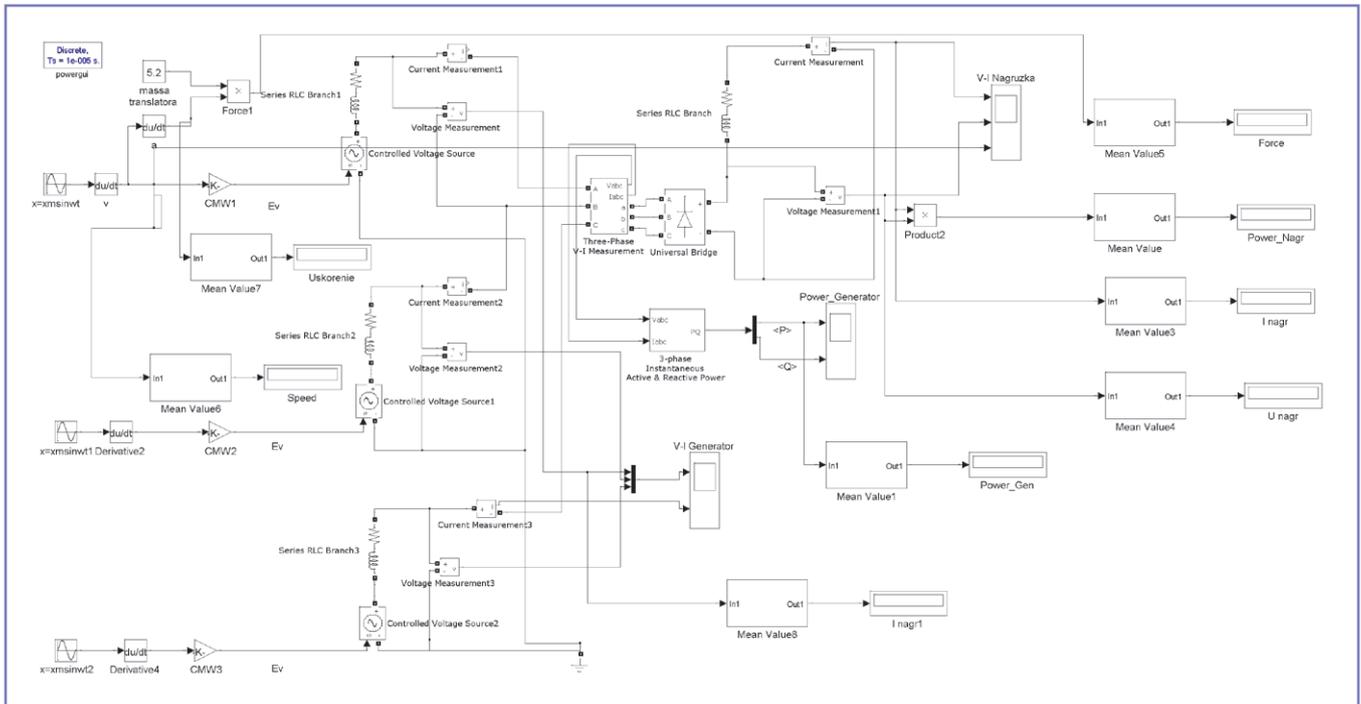


Рис. 3. Модель трехфазной линейной обратимой электрической машины возвратно-поступательного действия

F_M – магнитодвижущая сила магнита;
 W – число витков обмотки;
 k_μ – коэффициент насыщения 1,05;
 a – параметр, зависящий от длины магнита и воздушных зазоров.

Уравнение динамики движения транслятора линейного генератора

$$F_{пр} - F_{эм} - F_{тр} - F_{пруж} = m \frac{d^2x}{dt^2},$$

где $F_{пр}$ – сила приводного механизма (например, двигатель внутреннего сгорания);

$F_{эм}$ – электромагнитная сила линейного генератора;

$F_{тр}$ – сила трения;

$F_{пруж}$ – сила пружины или иного устройства, снижающего вибрации;

m – масса транслятора.

В качестве метода интегрирования выбран многошаговый метод переменного порядка Ode 23tb, использующий формулы численного дифференцирования [21].

Математическая модель трехфазной линейной обратимой электрической машины возвратно-поступательного

действия, показанная на рис. 3, состоит из последовательной ветви собственных параметров генератора, работающей на выпрямительный диодный мост UniversalBridge, подключенный к активному-индуктивной нагрузке.

На основе предварительного расчета определены основные размеры электрической машины, которая позволит обеспечить выработку минимальной мощности 10 кВт (таблица 1).

На основе разработанной имитационной модели трехфазной линейной обратимой электрической машины возвратно-поступательного действия проведены расчеты зависимостей вырабатываемой электрической мощности от частоты перемещения транслятора (ротора) электрической машины (рис. 4). Потенциал использования разрабатываемого линейного генератора лежит в диапазоне от 3 до 16 кВт, что позволяет в перспективе найти применение

данной конструкции в области малой энергетики и гибридного транспорта.

При проектировании машин важным является обеспечение прочностных характеристик деталей и узлов. Рассчитанные осевые нагрузки, действующие на транслятор электрической машины в зависимости от частоты транслятора (рис. 5), позволяют провести прочностной анализ вала транслятора и закрепленных на нем магнитов.

Обеспечение необходимой прочности следует рассматривать совместно с задачей обеспечения минимальной массы транслятора с целью достижения лучших кинематических и динамических характеристик.

Таблица 1. Предварительные размеры электрической машины

| Параметр | Значение | Единица измерения |
|----------------------------|----------|-------------------|
| Радиус воздушного зазора | 100 | мм |
| Активная длина транслятора | 270 | мм |
| Воздушный зазор | 1,5 | мм |
| Активная длина статора | 390 | мм |

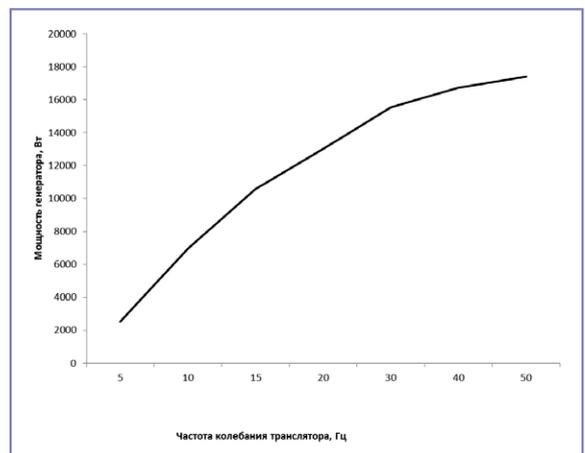


Рис. 4. Рассчитанная теоретическая зависимость мощности, вырабатываемой генератором, от частоты транслятора

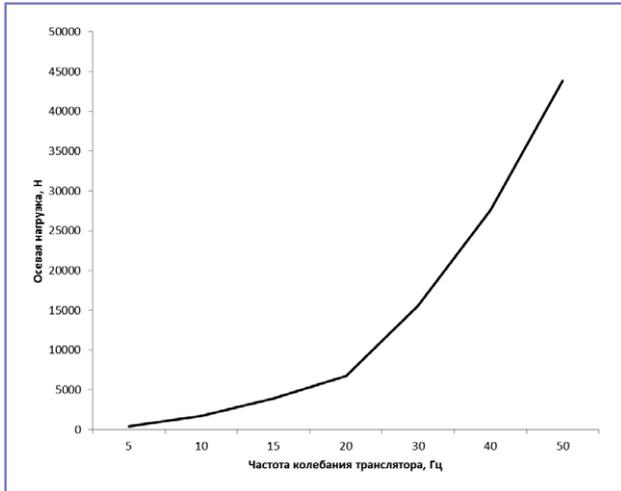


Рис. 5. Рассчитанная теоретическая зависимость осевой нагрузки на транслятор от частоты транслятора

Блок оптимизации для определения конструктивных размеров статора и транслятора электрической машины возвратно-поступательного движения

Целью оптимизации конструкции электрической машины возвратно-поступательного движения является получение максимальной электрической мощности генератора P_e .

Согласно [4] максимальная электромагнитная мощность, которая может быть получена от генератора,

$$P_e = \frac{1}{2} E_{vm} i_m \cos \varphi. \quad (4)$$

Учитывая выражение (2), получим

$$P_e = \frac{1}{2} C_{MW} x_m \omega \cos \omega t i_m \cos \varphi. \quad (5)$$

Проанализируем данное выражение. Повышение амплитуды колебаний x_m и частоты перемещения транслятора ω являются тривиальными решениями и ограничиваются техническим заданием и прочностными характеристиками машины. Ток генератора i_m ограничивается сечением обмотки статора и условиями охлаждения электрической машины. При работе на активную нагрузку можно принять $\cos \varphi \approx 0,9$. Коэффициент электромагнитной силы C_{MW} , согласно выражению (3), включает в себя конструктивные размеры статора и транслятора электрической машины, а также магнитодвижущую силу магнитов. Данный множитель выражения (5) можно принять за целевую функцию, которую необходимо максимизировать с учетом ограничений на входящие в нее параметры.

Расширим целевую функцию с учетом уравнений (7–12). Полученную

функцию (6) внесем в блок оптимизации приложения Optimization Toolbox.

В таблице 2 представлены параметры, входящие в целевую функцию, пределы, накладываемые на них с учетом конструктивных особенностей и технического задания, а также обозначения, принятые в приложении Optimization Toolbox:

$$C_{MW} = (1 - \alpha * \ln [1 + \frac{1}{2\alpha}]) \times \frac{2\mu_0 \pi D_M H_c L_M W}{\pi k_{cu} \alpha b_M} \rightarrow \max, \quad (6)$$

$$l = \pi D_M, \quad (7)$$

где l – длина окружности диаметра магнита.

$$F_M = H_c L_M, \quad (8)$$

где H_c – коэрцитивная сила магнита, Н/м;
 L_M – высота магнита.

$$W = \frac{k_{cu} * h_{окна} * b_{окна}}{S_M}, \quad (9)$$

где k_{cu} – коэффициент заполнения паза статора;

$h_{окна}$ – высота паза статора;

$b_{окна}$ – ширина паза статора;

S_M – сечение проводника в статоре.

$$k_{MW} = 1 - \alpha * \ln [1 + \frac{1}{2\alpha}], \quad (10)$$

$$\alpha = \frac{a}{b_M}, \quad (11)$$

где α – относительный параметр,

b_M – ширина магнита.

$$a = \frac{1}{\pi} [\frac{\mu_0}{\mu_r} L_M + 2\delta] \quad (12)$$

где a – условная толщина магнитов и зазоров, деленная на π ;

δ – воздушный зазор;

μ_r – магнитная проницаемость магнита.

Таблица 2. Параметры, входящие в целевую функцию

| Наименование переменной | Обозначение в приложении Optimization Toolbox | Пределы |
|-------------------------|---|---------------------------|
| C_{MW} | Максимизируемая величина | |
| μ_0 | $4\pi * 10^{-7}$ | |
| μ_r | $1,41 * 10^{-7}$ | |
| D_M | X(1) | $(195 - 205) * 10^{-3}$ м |
| L_M | X(2) | $(3 - 6) - 10^{-3}$ м |
| $h_{окна}$ | X(3) | $(25 - 45) 10^{-3}$ м |
| $b_{окна}$ | X(4) | $(5 - 10) 10^{-3}$ м |
| k_{MW} | X(5) | 0,6 – 0,9 |
| α | X(6) | 0,045 – 0,05 |
| a | X(7) | $(1,2 - 1,4) * 10^{-3}$ |

Задача оптимизации целевой функции решена в приложении Optimization Toolbox программы MATLAB. На языке MATLAB написана программа, позволяющая рассчитать параметры целевой функции на основе генетического алгоритма. Целесообразность применения генетических алгоритмов для решения задач данного типа обусловлена следующими причинами: реализацией простой, но достаточно эффективной схемы вычислений, возможностью применения как при непрерывном, так и при дискретном характере переменных, принципиальной возможностью учета ограничений, отсутствием требований к непрерывности, дифференцируемости и унимодальности критерия оптимизации, определением глобального экстремума целевой функции. Существенной особенностью рассматриваемого подхода является возможность его использования в сочетании с классическими методами.

Пакет оптимизации позволяет задать еще одну функцию минимизации, которая будет использоваться после окончания работы алгоритма. В качестве дополнительной функции, которая позволяет уточнить значение целевой функции, выбрана встроенная в MATLAB функция fmincon – для осуществления алгоритма с заданными ограничениями, основанного на методе последовательного квадратичного программирования [21].

На рис. 6 представлена визуализация вычислений на основе генетического алгоритма. Отрицательное значение целевой функции вызвано тем, что при максимизации целевой функции в программе MATLAB ее необходимо взять со знаком

Таблица 3. Рассчитанные параметры целевой функции

| Наименование переменной | Обозначение в приложении Optimization Toolbox | Рассчитанные значения |
|-------------------------|---|-----------------------|
| C_{MW} | Максимизируемая величина | 17,79 |
| μ_0 | $4\pi \cdot 10^{-7}$ | |
| μ_r | $1,41 \cdot 10^{-7}$ | |
| D_M | X(1) | $197 \cdot 10^{-3}$ м |
| L_M | X(2) | $3 \cdot 10^{-3}$ м |
| $h_{\text{окна}}$ | X(3) | $30 \cdot 10^{-3}$ м |
| $b_{\text{окна}}$ | X(4) | $5 \cdot 10^{-3}$ м |
| k_{MW} | X(5) | 0,88 |
| α | X(6) | 0,045 |
| a | X(7) | $1,2 \cdot 10^{-3}$ |

минус. Как видно из графика, решение достигается уже на половине популяций (стандартное значение 100). Полученное значение $C_{MW} = 17,79$ Н/А вводится в модель трехфазной линейной обратимой электрической машины (рис. 3).

Рассчитанные параметры на основе представленного метода оптимизации сведены в таблицу 3.

Данные значения закладываются в 3D-модели линейной электрической машины в САПР CATIA V5 для последующего кинематического и прочностного расчетов.

Проектирование 3D-модели линейной электрической машины в САПР CATIA V5

Данные моделирования в программном комплексе MATLAB Simulink на основе программ, написанных на языке MATLAB, передаются в проектную таблицу Excel, которая синхронизируется с САПР CATIA V5. В CATIA V5 строятся 3D-модели статора и транслятора электрической машины.

Блок Forge в модели трехфазной линейной обратимой электрической машины (рис. 3) рассчитывает осевые нагрузки на транслятор электрической машины, которые передаются на виртуальный осциллограф, и полученные значения записываются в файл Nagruzka.

Программный файл Export, интегрированный в данную модель, после окончания расчета выгружает полученные значения нагрузок в виде проектной Excel-таблицы, которая синхронизируется с САПР CATIA V5.

Общий вид электрической машины представлен на рис. 7. Для основы транслятора из встроенной библиотеки выбран материал титан, материал магнитов – NdFeB (неодим-железо-бор). Масса транслятора, вычисленная в САПР CATIA V5, составляет 5,2 кг, в аналогичных

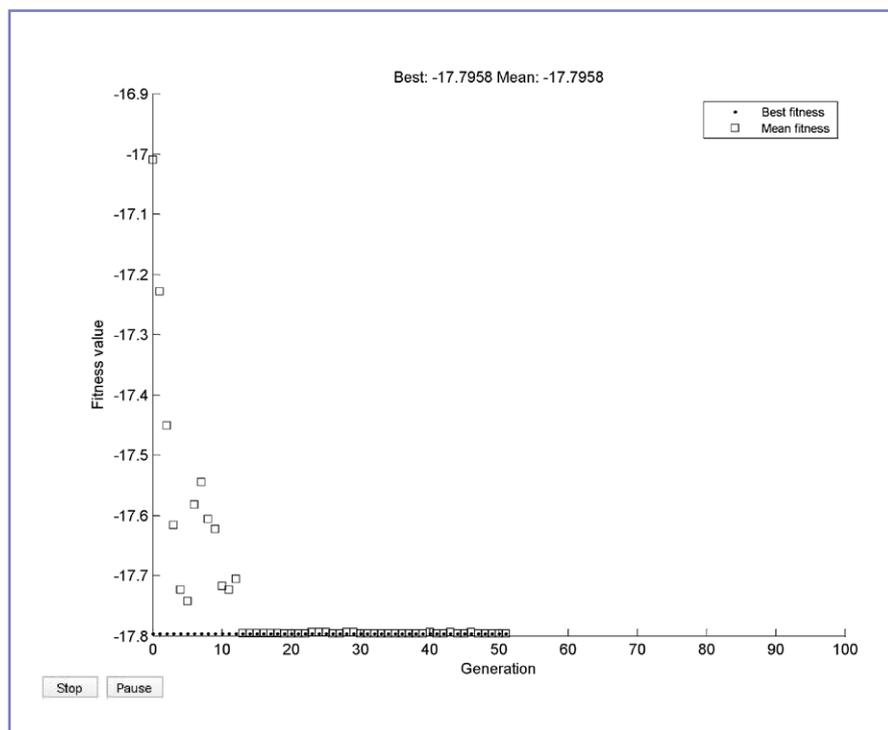


Рис. 6. График изменения значения целевой функции (Fitness value) в зависимости от количества популяций (Generation)

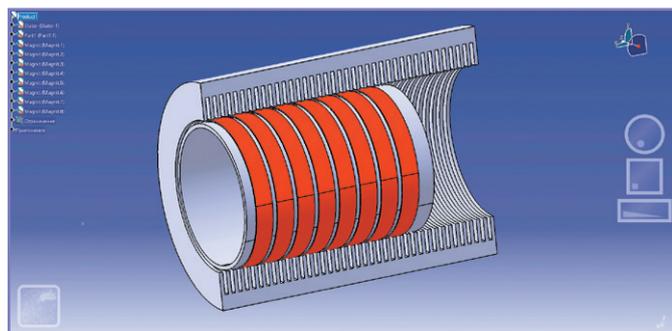


Рис. 7. 3D-модель линейного генератора в программе CATIA V5

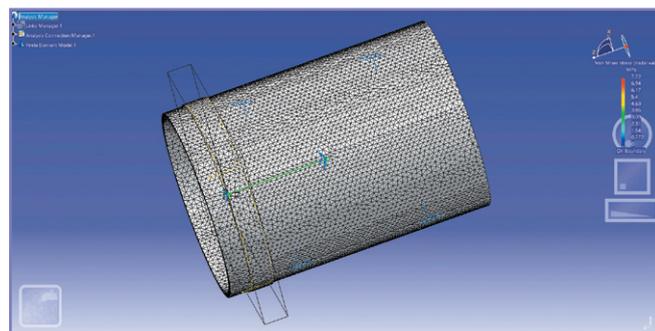


Рис. 8. Проведение прочностного анализа крепления магнита на трансляторе электрической машины

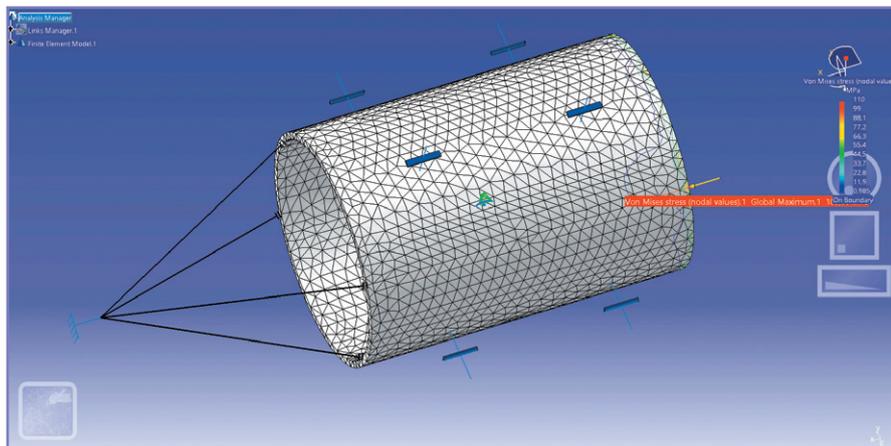


Рис. 9. Проведение прочностного анализа основы транслятора электрической машины

работках масса транслятора – порядка 10 кг [6, 15, 18].

На рис. 8 представлен прочностной анализ крепления магнита на трансляторе электрической машины. Максимальное механическое напряжение на крепления составляет 7,72 МПа, что необходимо учитывать при выборе способа монтажа магнитов на основу транслятора.

На рис. 9 представлен прочностной анализ основы транслятора электрической машины. Предполагается наличие только осевых нагрузок. Максимальное механическое напряжение составило 110 МПа, что позволяет использовать титан в качестве материала основы транслятора с учетом его механических характеристик.

Выводы

Предложена концепция параллельного моделирования (Co-simulation) на основе обмена данными между программами MATLAB Simulink и CATIA V5.

Разработан блок оптимизации в приложении Optimization Toolbox для определения конструктивных размеров статора и транслятора электрической машины возвратно-поступательного движения.

Разработанная методика позволяет на стадии проектирования определить рациональные параметры электрической машины с последующей отладкой при изготовлении экспериментального образца.

Результаты, полученные в ходе математического и численного моделирования электрической машины возвратно-поступательного движения, показывают эффективность использования различных программных комплексов с целью повышения эффективности

проектирования и оптимизации конструктивных параметров.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках реализации федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», соглашение о предоставлении субсидии от 20 октября 2014 года № 14.577.21.0121, уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI57714X0121.

Литература

1. Безруких П. П. Экономика и перспективы использования возобновляемых источников энергии в России // Электро, 2002, № 5. – С. 2–7.
2. Андреев Е. И. Основы естественной энергетики. – СПб.: Невская Жемчужина, 2004. – 584 с.
3. Baker N. J. Linear Generators for Direct Drive Marine Renewable Energy Converters, Ph. D. Thesis, School of Engineering, University of Durham (UK), 2003. – p. 265.
4. Хитереп М. Я., Овчинников И. Е. Синхронные электрические машины возвратно-поступательного движения. – СПб.: Корона Принт, 2013. – 386 с.
5. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
6. Rinderknecht F. The linear generator as integral component of an energy converter for electric vehicles // European All-Wheel Drive Congress Graz, 2011. 7 p.
7. Дьяконов В. П. MATLAB. Полный самоучитель. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 768 с.
8. Reshetnikov A. P., Ivshin I. V., Denisova N. V., Safin A. R., Misbakhov R. Sh., Kopylov A. M. Optimization of reciprocating linear generator parameters // International Journal of Applied Engineering Research, Volume 10, Issue 12, 28 July 2015, p. 31403–31414.
9. Kopylov A. M., Ivshin I. V., Safin A. R., Misbakhov R. Sh., Gibadullin R. R. Assessment, calculation and choice of design data for reversible reciprocating electric machine // International Journal of Applied Engineering Research, Volume 10, Issue 12, 28 July 2015, p. 31449–31462.
10. Gracheva E. I., Naumov O. V., Safin A. R. Evaluation criteria of contact group technical state concerning electrical appliances // International Journal Of Pharmacy & Technology, Volume 8, Issue 4, Dec. 2016, p. 27084–27091.
11. Safin A. R., Ivshin I. V., Misbakhov R. Sh., Tsvetkov A. N., Denisova N. V. Controlled rectifier simulation model development for reversible reciprocating electrical machine // International Journal Of Pharmacy & Technology, Volume 8, Issue 2, June 2016, p. 14059–14068.
12. Sirotkin R. O., Sirotkin O. S., Ivshin I. V., Safin A. R., Tsvetkov A. N., Dolomanyuk L. V. Titanium chemical nature features which determine its most important performance properties in linear engine-generator // Journal of Engineering and Applied Sciences, Volume 11, Issue 16, Aug. 2016, p. 9664–9666.
13. Comparison Research on Different Injection Control Strategy of CI Free Piston Linear Generator in One-time Starting Process / Yu Song, Huihua Feng, Zhengxing Zuo, Mengqiu Wang, ChendongGuo / Energy Procedia, Volume 61, 2014, p. 1597–1601, doi:10.1016/j.egypro.2014.12.180.
14. Gargov N. P., Zobaa A. F., Pisica I. Separated magnet yoke for permanent magnet linear generator for marine wave energy converters // Electric Power Systems Research, Volume 109, April 2014, p. 63–70.
15. Jin Xiao, Qingfeng Li, Zhen Huang. Motion characteristic of a free piston linear engine // Applied Energy. Volume 87, Issue 4, April 2010, p. 1288–1294, doi:10.1016/j.apenergy.2009.07.005.
16. Halit Karabulut. Dynamic analysis of a free piston Stirling engine working with closed and open thermodynamic cycles // Renewable Energy, Volume 36, Issue 6, June 2011, p. 1704–1709, doi:10.1016/j.renene.2010.12.006.
17. Boucher J., Lanzetta F., Nika P. Optimization of a dual free piston Stirling engine // Applied Thermal Engineering, Volume 27, Issue 4, March 2007, p. 802–811, doi:10.1016/j.applthermaling.2006.10.021.
18. Numerical analysis of two-stroke free piston engine operating on HCCI combustion / Shuaiqing Xu, Yang Wang, Tao Zhu, Tao Xu, Che Ngjun Tao // Applied Energy, Volume 88, Issue 11, November 2011, p. 3712–3725, doi:10.1016/j.apenergy.2011.05.002.

19. Polinder H., Gardner F. und Damen M. Design, modelling and test results of the AWS PM linear generator. Forschungsbericht, John Wiley and Sons LTD, Hoboken, 2005.

20. S. Jung und H. Choi. Performance evaluation of permanent magnet linear generator for charging the battery of mobile apparatus. Forschungsbericht, School of Electrical Engineering Seoul, National University Seoul, 2001.

Сафин Альфред Робертович

Родился в 1981 году. В 2004 году окончил Казанский государственный энергетический университет. Кандидат технических наук, доцент. Защитил диссертацию по теме «Разработка энергосберегающих схем и алгоритмов управления тяговыми двигателями постоянного тока электроподвижного состава». Опыт работы – 11 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета. Имеет 48 статей, 11 патентов, 5 учебно-методических пособий.

Ившин Игорь Владимирович

Родился в 1959 году. В 1982 году окончил Казанское высшее военное инженерное училище по специальности «Инженер-электрик». Доктор технических наук, профессор. В 1995 году защитил диссертацию по теме «Разработка методики диагностики лопаток турбины газотурбинного двигателя методом свободных колебаний». Опыт работы – 39 лет. В настоящее время работает заведующим кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета. Автор 124 научных и методических работ, из них 11 патентов и зарегистрированных программ для ЭВМ, 4 учебника с грифом МО РФ, 20 учебно-методических пособий.

Копылов Андрей Михайлович

Родился в 1991 году. В 2004 году окончил Казанский государственный энергетический университет, магистр техники и технологии. Опыт работы – 4 года. В настоящее время работает ассистентом кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета. Имеет 8 статей, 5 патентов.

Грачева Елена Ивановна

Родилась в 1960 году. В 1984 году окончила Казанский филиал МЭИ по специальности «Инженер-электрик». Доктор технических наук, доцент. В 2014 году защитила диссертацию по теме «Развитие теории и методов оценки эффективности функционирования низковольтных электрических сетей промышленных предприятий». Опыт работы – 31 год. В настоящее время работает профессором кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета. Имеет 48 статей, 11 патентов, 5 учебно-методических пособий.

Цветков Алексей Николаевич

Родился в 1974 году. В 1998 году окончил Казанский государственный энергетический университет, магистр техники и технологии по направлению «Электроэнергетика». Кандидат технических наук. В 2005 году защитил диссертацию по теме «Разработка методов автоматизированного проектирования, расчета и контроля магнитных систем спектрометров ЯМР». Опыт работы – 18 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета. Имеет 15 статей, 5 патентов, 2 учебно-методических пособия.

Safin Alfred

Was born in 1981. In 2004 he graduated from Kazan State Power Engineering University. Candidate of Engineering Science, assistant professor. Defended his dissertation on the subject «Designing of energy-conservative schemes and configurations of controlling of direct-current railway motors of electrically propelled vehicles». He has 11 years of work experience. At the present time he works as the assistant professor of «Power supply of industrial enterprises» Department in Kazan State Power Engineering University. He has 48 articles, 11 patents, 5 guidance manuals.

Ivshin Igor

Was born in 1959. In 1982 he graduated from Kazan artillery command academy majoring in «Electric engineering». He is Doctor of Technical Sciences, professor. In 1995 he defended

the dissertation, the subject is «Development of diagnosing technique of the turbine blades of the gas engine by the method of free oscillation regime». He has 39 years of work experience. At present he works as «Electric supply of industrial enterprises» department of Kazan State Power Engineering University. He is author of 124 scientific works and guidance, including 11 patents and registered programs for ECM, 4 manuals with Ministry of Defense stamp, 20 guidance manual.

Kopylov Andrey

Was born in 1991. In 2004 he graduated from Kazan State Power Engineering University, he is Master of engineering and technologies. He has 4 years of work experience. At present he works as teaching assistant of the «Electric supply of industrial enterprises» department of Kazan State Power Engineering University. He has 8 articles, 5 patents.

Gracheva Elena

Was born in 1960. In 1984 she graduated from affiliated institution of National Research University «MPEI» majoring in «Electric engineering». She is Doctor of Technical Sciences, associate professor. In 2014 she defended the dissertation, the subject is «Development of theory and methods of the efficiency elimination of low-voltage electrical networks of industrial enterprises». She has 31 years of work experience. At present she works as a professor of «Electric supply of industrial enterprises» department of Kazan State Power Engineering University. She has 48 articles, 11 patents, 5 guidance manuals.

Tsvetkov Alexey

Was born in 1974. In 1998 he graduated from Kazan State Power Engineering University, he is Master of engineering and technologies of «Electrical power engineering». He is Candidate of Technical Sciences. In 2005 he defended the dissertation with subject «Development of automated design methods, calculation and control of magnetic systems of NMR spectrometers». He has 18 years of work experience. At present he works as associate professor «Electric supply of industrial enterprises» department of Kazan State Power Engineering University. He has 15 articles, 5 patents, 2 guidance manual.

Расчеты токов короткого замыкания в тяговой сети переменного тока при учете системы внешнего электроснабжения

// Calculation of short-circuit current in alternating current traction catenary accounting for external electric power supply system //

Герман Л. А., д.т.н., профессор,
Нижегородский филиал МГУПС (МИИТ),
г. Нижний Новгород

Субханвердиев К. С.,
«Трансэлектропроект» – филиал ОАО «Росжелдорпроект», Москва

В работе отмечается, что среди принятых отраслевым нормативным документом допущений в расчете токов короткого замыкания определение сопротивления системы внешнего электроснабжения по мощности короткого замыкания на вводах в подстанцию допускает значительную методическую погрешность. Для определения указанной методической погрешности выполнены расчеты токов короткого замыкания для двух схем электроснабжения с ВЛ-110 кВ и ВЛ-220 кВ, включающие известное допущение и проведенные по реальным схемам внешнего электроснабжения. Из анализа сравнения результатов расчета токов короткого замыкания получена величина погрешности во всем диапазоне мощностей короткого замыкания на шинах тяговых подстанций 110 (220) кВ. Проведена экспериментальная проверка для подтверждения справедливости полученной погрешности расчета токов короткого замыкания в тяговой сети.
Ключевые слова: система внешнего электроснабжения, тяговая сеть, погрешность расчета, токи короткого замыкания, тяговая подстанция, переменный ток.

Постановка задачи

Расчеты токов короткого замыкания (КЗ) выполняются для различных целей, в частности, для выбора уставок релейной защиты, оценки возможного действия средств релейной защиты, анализа аварийных процессов в электроустановках [1]. Требуемая точность расчетов во многом определяет характер тех или иных допущений, упрощающих эти расчеты, и выбор методов решения поставленной задачи. Очевидно, что

It is emphasized in the study that, under assumptions adopted in the industry standard for calculation of short-circuit currents, determination of resistance of external power supply system based on the short-circuit current power on substation entry terminals allows for a considerable systematic error. To determine this systematic error, short-circuit current calculations were performed for two power supply layouts of VL-110kV and VL-220kV HV lines, one employing the common assumption and the other based on actual external power supply circuits. Comparative analysis of results produced under the two approaches yielded the error values across the short-circuit power range on the 110/220 kV traction substation busbars. Experimental verification was carried out to confirm the short-circuit current calculation error in the traction catenary.
Keywords: external electric power supply system, traction network, calculation error, short-circuit currents, traction substation, alternating current.

с увеличением необходимой точности расчетов усложняются математические модели [2, 3]. В [4] показано, что расчеты токов короткого замыкания при проектировании тяговых подстанций, как правило, выполняют по данным мощности короткого замыкания (КЗ) на шинах 110 (220) кВ, полученных от энергосистемы, так как к моменту расчетов обычно отсутствует прилегающая схема внешнего электроснабжения и набор исходных данных ограничен. Кроме того,

предоставляемые энергосистемой значения мощности КЗ получены для симметричной системы с несимметричным КЗ на каждой из подстанций. Однако при КЗ в тяговой сети при ее двухстороннем питании формируются две несимметрии на ВЛ-110 (220) кВ в районе тяговых подстанций. Все это указывает на сложность расчетов токов КЗ в тяговой сети и объясняет необходимость ввода ряда допущений в нормативный метод расчета [5].

В отраслевом нормативном документе по расчету токов КЗ в тяговой сети, в котором эквивалентное сопротивление системы внешнего электроснабжения (СВЭ) определяется по мощности КЗ на вводах 110 (220) кВ тяговых подстанций, приняты следующие допущения [5].

1. Сопротивление тяговой подстанции при двухфазном КЗ в тяговой сети представлено суммой сопротивлений системы внешнего электроснабжения и трансформатора. При этом система внешнего электроснабжения представлена симметричной трехфазной системой прямой последовательности.

2. При расчете сопротивления по мощности КЗ на вводах подстанции предложено использовать базовое напряжение энергосистемы, которое принимается приведенным к напряжению тяговой обмотки – 27,5 кВ (см. пример 4.1 в [5]). При расчете сопротивления тяговой подстанции предложено напряжение на ее шинах принимать равным:

- 27,2 кВ – для минимального режима энергосистемы;
- 27,5 кВ – для среднего и максимального режимов энергосистемы.

3. При расчете токов КЗ не учитываются тяговая нагрузка, транзитная нагрузка по продольной ВЛ-110 (220) кВ и т.д.

Метод расчетов с использованием мощности КЗ на шинах высокого напряжения подстанции для эквивалентирования сопротивлением системы

внешнего электроснабжения, в частности, широко применяется в промышленных электрических сетях.

Однако в системе тягового электроснабжения подобное эквивалентирование сети внешнего электроснабжения имеет ряд особенностей. При представлении энергосистемы сопротивлениями на вводах 110 (220) кВ двух смежных тяговых подстанций, вводимыми в схему замещения межподстанционной зоны [5], игнорируется электрическая связь между подстанциями, то есть ликвидируется их взаимное сопротивление по линиям 110 (220) кВ. В результате изменяется токораспределение в тяговой сети, подключенной к этим подстанциям. Тем самым допускается существенная методическая погрешность в расчетах токов короткого замыкания (КЗ) питающих линий контактной сети, которая увеличивается при уменьшении мощности КЗ на шинах 110 (220) кВ тяговых подстанций.

Задача статьи – определить реальную методическую погрешность в расчетах токов КЗ в тяговой сети во всем диапазоне мощностей КЗ на шинах 110 (220) кВ тяговых подстанций, выполняемых с использованием нормативного документа [5], когда сети внешнего электроснабжения заменяют эквивалентными сопротивлениями, определяемыми по мощности короткого замыкания на шинах 110 (220) кВ тяговых подстанций. При этом сравнение будем производить со значениями токов короткого замыкания, рассчитанными по реальным схемам внешнего электроснабжения. Ключевая задача настоящей статьи – оценить погрешность в расчетах токов КЗ в результате игнорирования связи между подстанциями по ВЛ110 (220) кВ в нормативном документе [5].

Для выполнения корректного сравнения все вышеуказанные допущения остаются в расчетах обоих вариантов. Принимаем приведенное напряжение на шинах районных подстанций равным 27,5 кВ. Таким образом, сравниваем два варианта:

- вариант, где схема внешнего электроснабжения эквивалентруется сопротивлением, рассчитанным по мощности КЗ на шинах тяговой подстанции;
- вариант, где рассматривается схема внешнего электроснабжения в полном объеме, то есть при полной схеме внешнего электроснабжения, питающей тяговые подстанции.

Для реализации задачи определения токов КЗ для двух схем электроснабже-

ния с ВЛ-110 кВ и ВЛ-220 кВ выполним следующий объем расчетов:

- расчет по нормативному документу [5], то есть при представлении энергосистемы сопротивлениями, полученными по заданной мощности короткого замыкания на шинах 110 (220) кВ тяговых подстанций;

- расчет по реальной схеме внешнего электроснабжения, в которой рассматриваются трехфазные сети ВЛ-110 (220) кВ и тяговые трансформаторы, а также однофазные тяговые сети. Расчет выполнен вручную, трехфазная система, представленная в фазных координатах, рассматривается в качестве фиктивной схемы прямой последовательности. Такие же результаты можно получить и по разработанной программе совместного расчета систем тягового и внешнего электроснабжения РАСТ-05К [6, 7, 8];

- приведем экспериментальные данные токов КЗ в тяговой сети схемы электроснабжения с ВЛ-110 кВ и сравним их с результатами расчетов по п. 1 и 2.

Рассмотрим две реальные схемы внешнего электроснабжения: С – Ш

с ВЛ-110 кВ Горьковской железной дороги с четырьмя тяговыми подстанциями и ВЛ-220 кВ с 14 тяговыми подстанциями Восточного региона страны. Расчеты выполним для ближних и дальних тяговых подстанций от питающей их районной подстанции.

Расчетные схемы электроснабжения и их параметры

Схема электроснабжения участка С – Ш

Вариант выполнения схемы участка (рис. 1) заимствован из [10].

Питание участка осуществляется от районной подстанции С с тремя автотрансформаторами АТ-125. Сопротивление прямой последовательности на шинах 110 кВ подстанции С (на схеме РП-1), приведенное к напряжению тяговой сети – 0,04 + j0,2 Ом.

Тяговые подстанции ТП-2 и ТП-4 – опорные, а ТП-1 и ТП-3 – промежуточные.

Длины участков сети ВЛ-110 кВ С – Ш указаны на рис. 1, а характеристики трансформаторов тяговых подстанций

Таблица 1. Характеристики трансформаторов тяговых подстанций расчетного участка

| Тяговая подстанция | Тип фазировки | Сном, МВА | Увн, кВ | Мощность КЗ, МВА |
|--------------------|---------------|-----------|---------|------------------|
| ТП-1 | 2 | 40 | 110 | 1324 |
| ТП-2 | 3 | 40 | 110 | 566 |
| ТП-3 | 3 | 40 | 110 | 367 |
| ТП-4 | 2 | 40 | 110 | 272 |

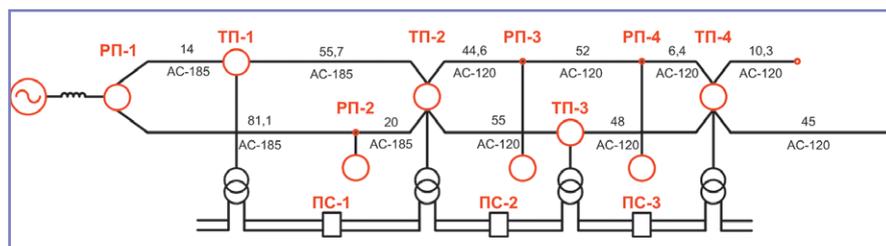


Рис. 1. Схема участка С – Ш с ВЛ-110 кВ Горьковской железной дороги с четырьмя тяговыми подстанциями

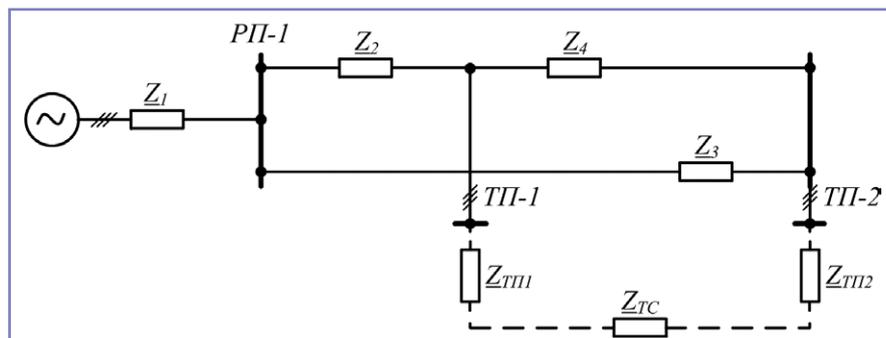


Рис. 2. Схема замещения участка ТП-1 – ТП-2 с ВЛ-110 кВ

Таблица 2. Результаты расчета токов КЗ по РАСТ-05К

| Условия расчета | Зона ТП-1 – ТП-2 Токи КЗ в тяговой сети в кА | | Зона ТП-3 – ТП-4 Токи КЗ в тяговой сети в кА | |
|---------------------|---|----------------------------|---|----------------------------|
| | КЗ на шинах ТП-1 | КЗ на шинах ТП-2 | КЗ на шинах ТП-3 | КЗ на шинах ТП-4 |
| По полной схеме СВЭ | $0,976e^{+j115,887^\circ}$ | $1,099e^{+j113,427^\circ}$ | $0,657e^{+j113,711^\circ}$ | $0,712e^{+j116,570^\circ}$ |
| По РУЗу [3] | $1,161e^{+j114,202^\circ}$ | $1,245e^{+j112,729^\circ}$ | $1,137e^{+j112,970^\circ}$ | $1,171e^{+j112,458^\circ}$ |
| Погрешность, % | 18,95 | 13,28 | 73,06 | 64,47 |

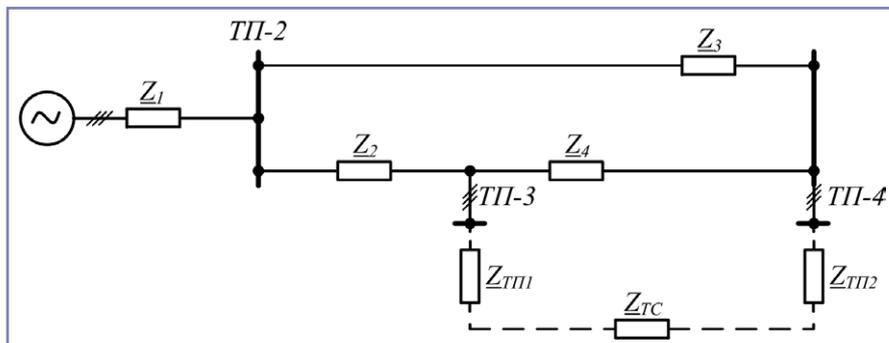


Рис. 3. Схема замещения участка ТП-3 – ТП-4 с ВЛ-110 кВ

расчетного участка С – Ш – в таблице 1.

Тяговая сеть четного и нечетного путей выполнена с подвеской ПБСМ95 + МФ-100, на схеме указаны посты секционирования ПС, выполненные на разьединителях. В расчетах принимаем сопротивления: АС-120–0,244 + j0,427 Ом/км, АС-185–0,159 + j0,413 Ом/км.

Расчеты токов КЗ в тяговой сети ТП-1 – ТП-2 и ТП-3 – ТП-4 (рис. 1)

• КЗ в межподстанционной зоне ТП-1 – ТП-2

Схема замещения рассматриваемого участка энергосистемы при КЗ в межподстанционной зоне ТП-1 – ТП-2 была преобразована к виду, представленному на рис. 2. Сопротивления ветвей схемы, приведенные к тяговому напряжению, получили значения

$$\begin{aligned} Z_1 &= 0,04 + j0,2 \text{ Ом,} \\ Z_2 &= 0,139 + j0,361 \text{ Ом,} \\ Z_3 &= 1,0 + j2,61 \text{ Ом и} \\ Z_4 &= 0,554 + j1,438 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Сопротивления обеих подстанций

$$Z_{ТП1} = Z_{ТП2} = 0,1 + j2,0 \text{ Ом.}$$

Значение сопротивления тяговой сети межподстанционной зоны ТП-1 – ТП-2 равно

$$Z_{ТС} = 5,886 + j15,533 \text{ Ом.}$$

Полученные по программе РАСТ-05К значения токов КЗ в тяговой сети к ТП-1 и ТП-2 (по сопротивлению $Z_{ТС}$ рис. 2) представлены в таблице 2. Например, при КЗ на шинах 27,5 кВ ТП-1 составляющая тока КЗ от ТП-2 будет $0,976e^{+j115,887^\circ}$, а при КЗ на шинах 27,5 кВ

ТП-2 составляющая тока КЗ от ТП-1–1,099 $e^{+j113,427^\circ}$.

Далее расчет КЗ выполним по схеме замещения, при которой система внешнего электроснабжения эквивалентруется сопротивлениями, определяемыми мощностью КЗ на шинах 110 кВ тяговых подстанций, то есть когда не учитывается реальная связь между смежными подстанциями по сети 110 кВ. Для повышения точности результатов сравнения мощность КЗ на шинах 110 кВ тяговых подстанций определим по рассчитанным сопротивлениям (рис. 2), и по ней, в итоге, будут найдены собственные сопротивления тяговых подстанций (при отключенной тяговой сети). В результате

получены собственные сопротивления шин 110 кВ ТП-1 и ТП-2 соответственно: 0,168 + j0,532 Ом и 0,45 + j1,265 Ом (приведены к напряжению 27,5 кВ).

• КЗ в межподстанционной зоне ТП-3 – ТП-4

По исходным данным получены сопротивления для схемы, показанной на рис. 3, приведенные к напряжению 27,5 кВ:

$$\begin{aligned} Z_1 &= 0,45 + j1,265 \text{ Ом,} \\ Z_2 &= 0,839 + j1,468 \text{ Ом,} \\ Z_3 &= 1,57 + j2,75 \text{ Ом и} \\ Z_4 &= 0,73 + j1,28 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Сопротивления обеих подстанций $Z_{ТП1} = Z_{ТП2} = 0,1 + j2,0$ Ом. Значение сопротивления тяговой сети межподстанционной зоны ТП-3–ТП-4 равно $Z_{ТС} = 4,957 + j13,082$ Ом. Собственные узловые сопротивления шин 110 кВ ТП-3 и ТП-4 соответственно: 1,065 + j2,34 Ом и 1,236 + j2,639 Ом (приведены к напряжению 27,5 кВ).

Найденные по программе РАСТ-05К токи КЗ в тяговой сети по $Z_{ТС}$ к ТП-3 и ТП-4 представлены в таблице 2.

Схема электроснабжения участка 220 кВ

Сеть 220 кВ (рис. 4) питает тяговые подстанции по консольной линии с разделом энергосистем по подстанциям ТП-14 и ТП-15, в связи с чем по межподстанционной зоне ТП-13 – ТП-14 организовано встречно-консольное питание межподстанционной зоны. Такой же раздел выполнен в зоне ТП-11 – ТП-13.

Энергосистема за пределами рассматриваемой части учтена эквивалентными сопротивлениями прямой

Таблица 3. Характеристики трансформаторов тяговых подстанций расчетного участка

| Тяговая подстанция | Тип фазировки | Сном, МВА | Увл, кВ | Мощность КЗ, МВА |
|--------------------|---------------|-----------|---------|------------------|
| ТП-1 | 1 | 40 | 230 | 1360 |
| ТП-2 | 1 | 40 | 230 | 1052 |
| ТП-3 | 2 | 40 | 230 | 884 |
| ТП-4 | 3 | 40 | 230 | 852 |
| ТП-5 | 3 | 40 | 230 | 825 |
| ТП-6 | 2 | 40 | 230 | 661 |
| ТП-7 | 1 | 40 | 230 | 589 |
| ТП-8 | 1 | 40 | 230 | 549 |
| ТП-9 | 2 | 40 | 230 | 529 |
| ТП-10 | 3 | 40 | 230 | 518 |
| ТП-11 | 3 | 40 | 115 | 448 |
| ТП-12 | 2 | 40 | 230 | 442 |
| ТП-13 | 3 | 40 | 230 | 391 |
| ТП-14 | 3 | 40 | 230 | 518 |
| ТП-15 | 2 | 40 | 230 | 593 |
| ТП-16 | 1 | 40 | 230 | 673 |

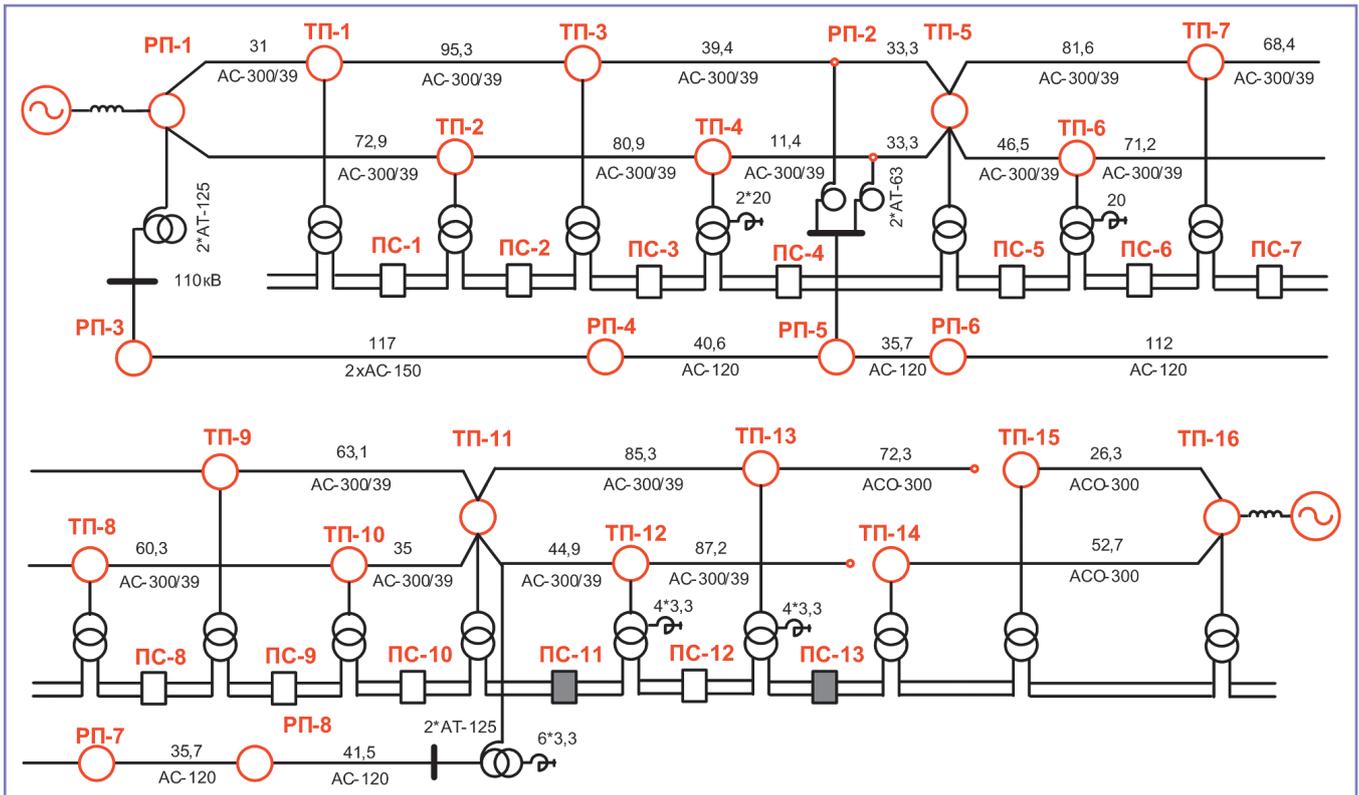


Рис. 4. Схема участка с ВЛ-220 кВ с 14 тяговыми подстанциями Восточного региона страны

последовательности $4 + j26,5$ Ом со стороны ТП-1 и $9 + j78$ Ом – со стороны ТП-16. Напряжение за эквивалентами равно 230 кВ.

Питание тягового электроснабжения расчетного участка осуществляется трансформаторами тяговых подстанций, параметры которых представлены в таблице 3. Контактная сеть выполнена: на участке ТП-1 – РС-1 М95 + МФ-100, а на остальных участках ПБСМ-95 + МФ-100. На некоторых участках дополнительно подвешен усиливающий трос А-185.

Поглощение реактивной генерации линий 220 кВ осуществляется шунтирующими реакторами подстанций ТП-4, ТП-6, ТП-11, ТП-12, ТП-13, параметры реакторов показаны на рис. 4.

Расчеты токов КЗ в тяговой сети ТП-1 – ТП-2 и ТП-12 – ТП-13 (рис. 4)

• КЗ в межподстанционной зоне ТП-1 – ТП-2

Схема замещения рассматриваемого участка энергосистемы при КЗ в межподстанционной зоне ТП-1 – ТП-2 преобразована к виду, представленному на рис. 5. Сопротивления ветвей схемы, приведенные к тяговому напряжению, получили следующие значения:

$$Z_1 = 0,06 + j0,38 \text{ Ом},$$

$$Z_2 = 0,04 + j0,18 \text{ Ом},$$

$$Z_3 = 0,10 + j0,42 \text{ Ом},$$

$$Z_4 = 0,24 + j0,96 \text{ Ом},$$

$$Z_5 = 0,18 + j0,72 \text{ Ом}.$$

Сопротивления обеих подстанций рассматриваемой зоны следующие:

$$Z_{ТП1} = Z_{ТП2} = j2,36 \text{ Ом}.$$

Для участков ТП-1 – РС и РС – ТП-2 сопротивления составляют $Z_{ТС}^1 = 1,845 + j6,47$ Ом и $Z_{ТС}^2 = 2,668 + j7,04$ Ом соответственно.

Внесение полученных данных в программу PACT-05K позволило рассчитать

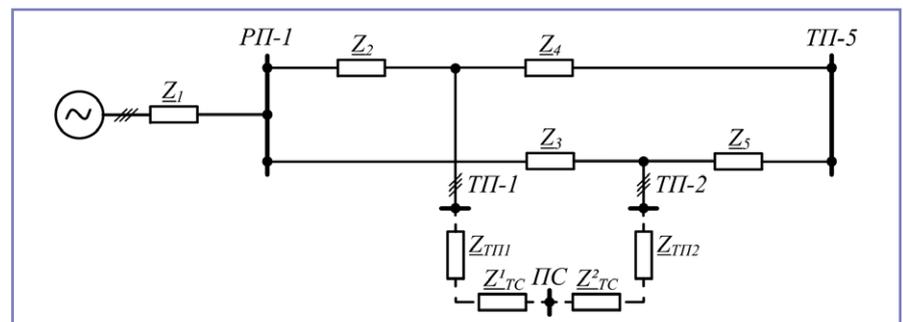


Рис. 5. Схема замещения участка ТП-1 – ТП-2 с ВЛ-220 кВ

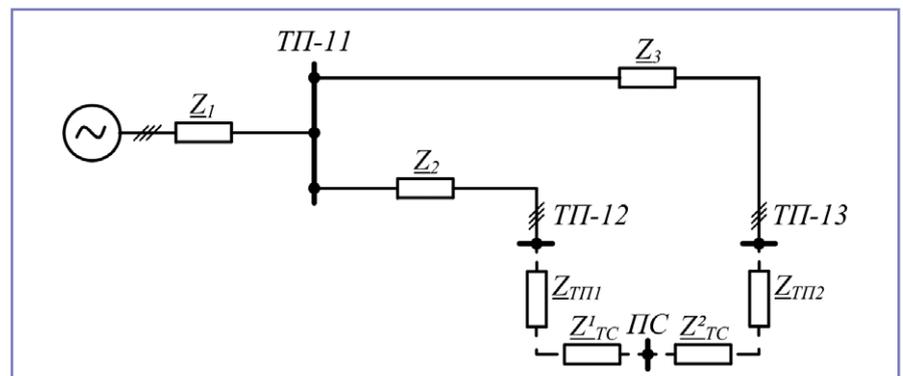


Рис. 6. Схема замещения участка ТП-12 – ТП-13 с ВЛ-220 кВ

Таблица 4. Результаты расчета токов КЗ по программе PACT-05K

| Условия расчета | Зона ТП-1 – ТП-2 Токи КЗ в тяговой сети в кА | | Зона ТП-12 – ТП-13 Токи КЗ в тяговой сети в кА | |
|---------------------|---|----------------------------|---|----------------------------|
| | КЗ на шинах ТП-1 | КЗ на шинах ТП-2 | КЗ на шинах ТП-12 | КЗ на шинах ТП-13 |
| По полной схеме СВЭ | $1,156e^{+j110,772^\circ}$ | $1,187e^{+j110,324^\circ}$ | $0,789e^{+j112,936^\circ}$ | $0,829e^{+j112,226^\circ}$ |
| По РУЗу [2] | $1,339e^{+j109,906^\circ}$ | $1,362e^{+j109,663^\circ}$ | $1,193e^{+j109,628^\circ}$ | $1,219e^{+j109,482^\circ}$ |
| Погрешность, % | 15,83 | 14,74 | 51,2 | 47,04 |

токораспределение в тяговой сети при КЗ в рассматриваемых расчетных точках. Результаты расчетов представлены в таблице 4.

• КЗ в межподстанционной зоне ТП-12 – ТП-13

Схему замещения участка энергосистемы при КЗ в зоне между подстанциями ТП-12 – ТП-13 можно представить в виде рис. 6. Значения сопротивлений ветвей схемы, приведенные к напряжению 27,5 кВ, равны $Z_1 = 0,35 + j1,56$ Ом, $Z_2 = 0,06 + j0,26$ Ом и $Z_3 = 0,12 + j0,49$ Ом.

Сопротивления подстанций ТП-12 и ТП-13 и сопротивления тяговой сети на участках ТП-1 – ПС и ПС – ТП-2 в соответствии с исходными данными: $Z_{ТП1} = Z_{ТП2} = j2,36$ Ом и $Z_{ТС}^1 = 3,067 + j8,094$ Ом, $Z_{ТС}^2 = 1,901 + j5,016$ Ом. С помощью программы PACT-05K получены токи по питающим линиям контактной сети в случае КЗ в расчетных точках межподстанционной зоны. Полученные результаты расчета в программе сведены в таблице 4.

Анализ результатов расчета токов КЗ

Расчеты показали, что для тяговых подстанций, близко расположенных к районной подстанции, погрешность составляет в сети 110 кВ:

- 18,95% – для первой подстанции ТП-1 с мощностью КЗ 1324 МВА;
- 13,28% – для второй подстанции ТП-2 с мощностью КЗ 566 МВА, а в сети 220 кВ:
- 15,83% – для первой подстанции ТП-1 с мощностью КЗ 1360 МВА;
- 14,74% – для второй подстанции ТП-2 с мощностью КЗ 1052 МВА.

Для тяговых подстанций, удаленных от районной подстанции, погрешность составляет в сети 110 кВ:

- 73,06% – для ТП-3 с мощностью КЗ 367 МВА;
- 64,47% – для ТП-4 с мощностью КЗ 272 МВА, а для сети 220 кВ:
- 51,2% – для ТП-12 с мощностью КЗ 442 МВА;

- 47,04% – для ТП-13 с мощностью КЗ 448 МВА.

Как видно, во всем диапазоне мощностей КЗ на шинах тяговых подстанций 110 (220) кВ рассматриваемых реальных участков различных регионов страны погрешности в расчетах токов КЗ составляют 13,28–73,06%. Можно предположить, что указанная погрешность будет и на других участках тяговой сети отечественных железных дорог.

Укажем те участки, где рассматриваемая погрешность будет минимальной. Во-первых, это участки тяговой сети с односторонним питанием. Во-вторых, участки, где тяговые подстанции подключены непосредственно к районным подстанциям, то есть там, где величина взаимного сопротивления двух тяговых подстанций, питающих рассматриваемую межподстанционную зону, имеет минимальное значение.

В связи с указанным рекомендуется:

- на действующем участке электрооборудования производить проверочные опыты КЗ для измерений реальных токов КЗ;

• расчет токов КЗ в тяговой сети переменного тока с двухсторонним питанием производить на разработанной программе для ЭВМ PACT-05K [4, 5, 6].

Для подтверждения справедливости полученных погрешностей расчета токов КЗ в тяговой сети проведена экспериментальная проверка с КЗ в тяговой сети действующего участка.

Экспериментальная проверка токов КЗ в тяговой сети

Измерение тока КЗ на тяговой подстанции ТП-4 схемы электроснабжения С – Ш (см. рис. 1) произведено автоматически 6 марта 2017 года измерительно-информационным комплексом «Черный ящик 2000» (ИТЦ ГОСАН), установленным на тяговой подстанции ТП-4.

На осциллограмме (рис. 7) представлены следующие кривые:

- «27,5 кВ ввод 27» – напряжение ввода 27,5 кВ Ubc;
- «27,5 кВ ввод 1» – ток ввода Ibc;
- «27,5 кВ. Ф к/с...» – токи фидеров 1, 2, 3, 4, 5 Ibc.

КЗ произошло на станционном фидере (Ф к/с 3), ток КЗ – 3262 А, токи «подпитки» КЗ от тяговой подстанции ТП-3 равны 381 А (от фидера Ф к/с 1) и 387,8 А (от Ф к/с 2). Фидеры 4 и 5 отключены для раздела по контактной сети со следующей подстанцией (в связи с разделом питания на ВЛ-110 кВ).

Ток ввода 27,5 кВ равен току фидера 3 за минусом токов фидеров 1 и 2. Напряжение на вводе 27,5 кВ до КЗ равно 27,96 кВ, и оно зависит от положения

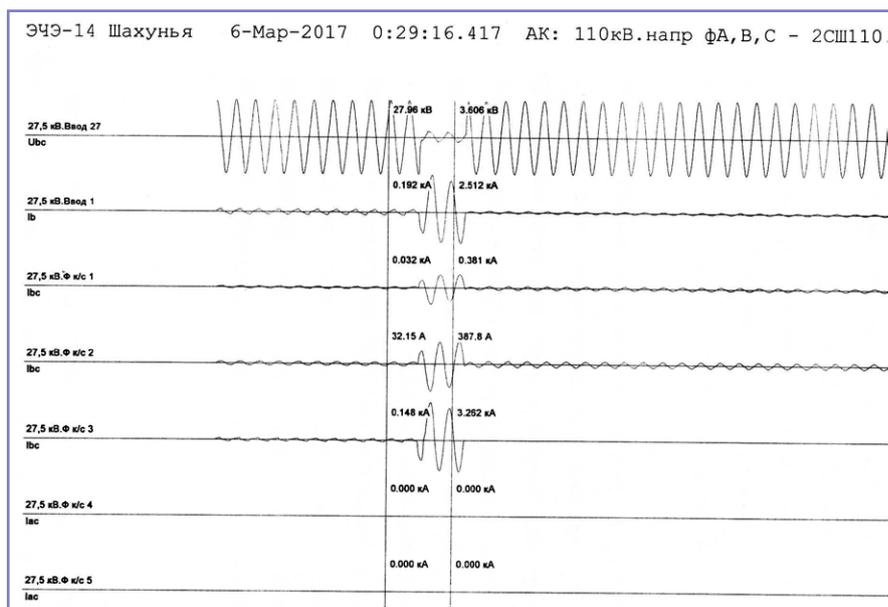


Рис. 7. Осциллограмма токов КЗ на тяговой подстанции ТП-4 схемы участка С – Ш с ВЛ-110 кВ

переключателя РПН трансформатора на момент КЗ.

На межподстанционной зоне ТП-3 – ТП-4 установлен пост секционирования на разъединителях, который при КЗ не отключился, так как его задержка на отключение составляет 1 с. Вакуумный выключатель станционного фидера отключился через 0,045 с от максимальной токовой отсечки, в результате восстановился нормальный режим ТП-4.

Теперь оценим точность расчетов токов КЗ по программе РАСТ-05К в сравнении с экспериментальными данными. Так как КЗ в эксперименте было не на шинах 27,5 кВ, а на станционных путях, то сравнение произведем по соотношению токов в тяговой сети (токи «подпитки» от ТП-3) и в трансформаторе ТП-4.

В эксперименте это соотношение равно $2512/768,8 = 3,27$, а по программе РАСТ-05К – $2468/712 = 3,47$. Еще раз подчеркнем, что в эксперименте присутствовали реальные параметры сетей, тяговые и районные нагрузки, установка поперечной емкостной компенсации на РП-4 была включена, и как обычно на районной подстанции напряжение на шинах питания продольной ВЛ-110 было на 5% выше номинального напряжения. С другой стороны, в расчете по программе РАСТ-05К напряжение на районной подстанции принято номинальным. Как видно, отличие указанных соотношений при расчетах токов КЗ в тяговой сети по программе РАСТ-05К в 6,1% свидетельствует, на наш взгляд, о достаточном совпадении расчетов и экспериментальных данных по токам КЗ.

Главный результат эксперимента по токам КЗ в тяговой сети: ток КЗ в тяговой сети 768,8 А намного меньше проектного значения по [3] – 1171 А (то есть меньше в $1171/768,8 = 1,52$ раза) – и близок к расчетному току в тяговой сети при рассмотрении полной схемы СВЭ – 712 А. Таким образом, на основании экспериментальных данных доказана значительная погрешность в расчетах токов КЗ по нормативному документу [5]. Кроме того, показана возможность оценки токов КЗ в однофазной тяговой сети при учете трехфазной системы внешнего электроснабжения по программе РАСТ-05К. Как следствие, можно утверждать, что проведенные эксперименты подтверждают значительную погрешность по токам КЗ в тяговой сети до 50–70% при сравнении с расчетами по нормативному методу [5] и по программе РАСТ-05К.

Некоторые специалисты считают, что при расчете токов КЗ в тяговой сети следует учитывать нагрузку тяговой сети, транзитной мощности по линиям 110 (220) кВ и уравнивающие токи. Соглашаясь в принципе с указанным мнением, отметим следующее.

В [9] проанализировано поведение электровоза в момент короткого замыкания в тяговой сети и сделано следующее заключение: «...если КЗ отключается защитой за время 0,1–0,15 с, то с наличием поездов на линии и их влиянием на процесс КЗ можно не считаться...».

Считаем, что указанное (а именно неучет влияния электровозов на процесс КЗ) справедливо только для тяговой нагрузки на межподстанционной зоне, где произошло КЗ. Однако тяговую нагрузку на других межподстанционных зонах так же, как и транзитную мощность по продольной ВЛ-110 (220), питающую тяговые подстанции, и уравнивающие токи в тяговой сети следует учитывать, что, в итоге, будет представлять собой учет нагрузочных потерь напряжения в сетях внешнего электроснабжения при расчете токов КЗ в тяговой сети.

Обычно при проектировании и в эксплуатации принимают комплекс организационных и технических мер для приближения напряжения у потребителя к номинальному. На районной подстанции, питающей продольную линию ВЛ-110 (220) кВ, напряжение повышают на 5% (то есть повышают приведенное напряжение до 29 кВ), включают компенсирующие установки и т.д. В частности, в представленной на рис. 1 схеме включают на РП-4 на шинах 110 кВ установку поперечной емкостной компенсации мощностью 36 Мвар, компенсирующую почти всю реактивную нагрузку участка С – Ш. Точно так же в схеме, показанной на рис. 4, включают шунтирующие реакторы для компенсации зарядной мощности ВЛ-220 кВ. Для снижения нагрузочных потерь учитывается зарядная мощность ВЛ-110 (220) кВ.

Таким образом, указанные мероприятия в какой-то мере компенсируют нагрузочные потери напряжения от тяговой нагрузки, транзитных токов по ВЛ-110 (220) кВ и т.д., точный расчет которых затруднителен в связи с неопределенностью данных по нагрузкам. Поэтому на вводе районной подстанции будем принимать номинальное напряжение 27,5 кВ (а не 29 кВ), что и предполагается, в частности, в [9]. Другими

словами, будем учитывать в расчетах нагрузочные потери напряжения в линиях внешнего электроснабжения.

Отметим, что при сравнении указанных вариантов можно было бы пренебречь нагрузочными потерями в линиях внешнего электроснабжения, так как эффект их учета будет одинаковым в сравниваемых вариантах.

Выводы

1. По нормативному документу [5] токи КЗ в тяговой сети определяются с учетом мощности КЗ на шинах 110 (220) кВ. Это приводит к методической ошибке в расчетах токов КЗ тяговой сети с двухсторонним питанием, так как в этом случае игнорируется взаимное сопротивление тяговых подстанций, питающих рассматриваемую межподстанционную зону. Причем с ростом удаленности тяговых подстанций от районных подстанций указанная погрешность возрастает.

2. Методическая ошибка в расчетах токов КЗ для тяговых подстанций, близко расположенных к районной подстанции, составляет около 15%, а для тяговых подстанций, далеко расположенных от районной подстанции, достигает 74%.

3. Расчет токов КЗ по нормативным документам возможен для тяговой сети с односторонним питанием и для межподстанционных зон, где тяговые подстанции подключены непосредственно к районным подстанциям.

4. Как правило, расчет токов КЗ в тяговой сети по нормативным документам [5] связан с большой погрешностью. Это указывает на необходимость корректировки нормативных документов в части расчетов токов КЗ в тяговой сети с учетом сетей внешнего электроснабжения.

5. В связи со значительной погрешностью расчетов тока КЗ по нормативному документу [5] необходимо на действующих участках электроснабжения проводить экспериментальные проверки реальных токов КЗ.

6. Экспериментальная проверка токов КЗ в тяговой сети действующего участка электроснабжения доказала возможность применять программу РАСТ-05К для расчета токов КЗ в однофазной тяговой сети при учете трехфазной системы внешнего электроснабжения.

7. Для уточнения расчетов токов КЗ в тяговой сети с двухсторонним питанием следует учитывать взаимное сопротивление тяговых подстанций,

питающих рассматриваемую межподстанционную зону, и использовать специально разработанную программу РАСТ-05К для ЭВМ [8], прошедшую государственную регистрацию Роспатента Российской Федерации.

Литература

1. Крючков И. П., Старшинов В. А., Гусев Ю. П., Пираторов М. В. Переходные процессы в электроэнергетических системах: учебник для вузов / Под ред. И. П. Крючкова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – 416 с.
2. ГОСТ 27514–87. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением выше 1 кВ.
3. Крючков И. П., Неклепаев Б. Н., Старшинов В. А. и др. Расчет коротких замыканий и выбор электрооборудования. Учебное пособие для студентов высших учебных заведений / Под ред. И. П. Крючкова и В. А. Старшинова. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 416 с.
4. Герман Л. А., Кишкурно К. В., Субханвердиев К. С. Оценка погрешности расчета токов короткого замыкания в тяговой сети переменного тока // Электроника и электрооборудование транспорта, 2017, № 1. С. 11–15.
5. Руководящие указания по релейной защите систем тягового электроснабжения ЦЭ. – М.: Трансиздат, 2005. – 216 с.
6. Герман Л. А., Морозов Д. А. Расчет типовых задач тягового электроснабжения переменного тока на ЭВМ. Учебное пособие. – М.: МИИТ, 2010. – 59 с.
7. Герман Л. А., Кишкурно К. В. Регулирование напряжения в тяговой сети переменного тока железных дорог // Электричество, 2014, № 9. С. 23–34.
8. Герман Л. А. Программа совместного расчета систем тягового и внешнего электроснабжения РАСТ-05К / Л. А. Герман, К. В. Кишкурно // Свидетельство Роспатента РФ № 2014612195 от 28.10.13 о государственной регистрации программы для ЭВМ.
9. Фигурнов Е. П. Релейная защита. Ч. 2. – М.: ГОУ «УМЦ по образованию на железнодорожном транспорте», 2009. – 604 с.
10. Герман Л. А., Куров Д. А. Автоматическое регулирование напряжения трансформаторов на тяговых подстанциях переменного тока // Электроника и электрооборудование транспорта, 2012, № 1. – С. 19–26.

Герман Леонид Абрамович

Родился в 1937 году. Окончил Московский институт инженеров транспорта (МИИТ) по специальности «Инженер путей сообщения – электромеханик» (1959 год). Защитил докторскую диссертацию по теме «Теория и практика совершенствования режима системы тягового электроснабжения переменного тока с установками емкостной компенсации». Доктор технических наук, профессор кафедры «Электрификация и электроснабжение» Нижегородского филиала Московского государственного университета путей сообщения, член-корреспондент Российской Академии транспорта. Автор более 350 научных трудов, 70 изобретений и патентов. Имеет 2 правительственные награды.

Субханвердиев Камиль Субханвердиевич

Родился в 1989 году. В 2012 году окончил МГУПС (МИИТ) по специальности «Электроснабжение железных дорог». Опыт работы – 4 года. В настоящее время работает инженером I категории в Проектно-исследовательском институте электрификации железных дорог и энергетических установок «Трансэлектропроект» – филиале ОАО «Росжелдорпроект». Имеет 3 научные статьи.

German Leonid

Was born in 1937. He has graduated Moscow Institute of Transport Engineers by specialty «Engineer routes – electrician» (1959). He has defended the dissertation by the theme «Theory and practice of improving treatment system traction below the AC power plants with capacitive compensation». He is a Doctor of Technical Sciences, Professor of dept. «Electrification and Utilities» at The Nizhny Novgorod branch of the Russian State University of Transport Communications. He is a corresponding member of the Academy of Transport of the Russian Federation. Author of more than 350 scientific works, 70 inventions and patents. Has 2 government awards.

Subhanverdiev Kamil'

Was born in 1989. In 2012 he graduated from Moscow State University of Railway Engineering with specialization «Railways electric power supply». He has 4 years of work experience. At present, he works as a first class engineer at Design and survey institute of railways electrification and electric power plants «Transelectroproject» – branch of «Roszheldorproject». He has 3 scientific works.

Электронное управление распределенными транспортными процессами с помощью многосерверных систем обработки информации

// Electronic control of distributed the transport processes by using multi-server processing systems //

Болнокин В. Е., Нгуен Динь Чунг,
ФГУП НИИАЭ, Москва

Феофанов С. А.,
МАДИ, Москва

В статье рассмотрены вопросы подключения телематических электронных систем сбора данных и разработаны математические модели для расчета характеристик многосерверной системы обработки запросов с их программным управлением.

Ключевые слова: бортовые системы электрооборудования, сбор данных, телематика, системы обработки запросов, управление потоками данных, математические модели.

Одной из актуальных тенденций в современном мире является непрерывное увеличение объемов мировых автотранспортных грузовых и пассажирских перевозок, что приводит к необходимости оперативного мониторинга как технического состояния, так и положения грузов и транспортных средств. Решение данной задачи сопровождается внедрением электрических и электронных систем, интегрированных в сложные информационные системы, которые способствуют улучшению функциональных, экономических, экологических и эргономических показателей. Одними из наиболее динамично развивающихся звеньев всего комплекса автотранспортной телематики являются системы, обеспечивающие сбор, преобразование и передачу информации.

Решение задач управления логистическими процессами грузоперевозок (ЛПГП) требует автоматизированного сбора (с помощью специализированных датчиков и электронных систем), микропроцессорной обработки и хранения больших объемов данных, обмена информацией между рабочими местами сотрудников, подразделениями и филиалами транспортной компании, решения сложных аналитическо-вычислительных задач. Для эффективного оперативного

In the article questions the connection of telematics electronic data acquisition systems and mathematical models to calculate the characteristics of a multi-request processing system of program management. Keywords: on-board electrical system, data acquisition, telematics, query processing systems, dataflow management, mathematical models.

сбора информации применяют онлайн-терминалы мониторинга, датчики расхода и уровня топлива, бесконтактные считыватели с шины CAN, датчики GPS/ГЛОНАСС-мониторинга, датчики контроля нагрузки на ось, температурные датчики с GSM-передатчиком, тахографы, датчики дверных контактов, систему контроля давления в шинах и многие другие. Собираемые огромные массивы данных предполагают использование высокопроизводительной вычислительной техники и современных математических методов для оперативного принятия решения и выявления причин возникновения проблем, в том числе неявных [1, 7–11].

Одним из основных направлений применения микропроцессорной техники в случае автоматизации управления перевозкой грузов является создание информационных систем (ИС). Однако при этом возникает проблема разработки методов построения и анализа интегрированной распределенной системы ЛПГП, создаваемой на базе разнородного программного и технического оснащения и обеспечивающей требуемый сервис.

ЛПГП является распределенной интегрированной гетерогенной информа-

ционной системой, объединяющей локальные информационные подсистемы и базы данных.

Подобная информационная система должна обеспечивать решение следующих функциональных задач [1, 7–9]:

- фиксация приема заказов на перевозку грузов с применением электронных технических средств и их обработку;
- поиск и назначение перевозчиков;
- разработка маршрутов перевозок;
- составление логистических планов (графиков) перевозок;
- оперативное управление поставками и оценка эффективности выполнения доставки;
- сбор и обработка данных от систем транспортной телематики для оценки технического состояния автотранспортных средств и грузов;
- составление и обработка разнообразной документации (договоры, контракты, декларации и т.д.);
- планирование ремонта транспортных средств;
- связь со смежными предприятиями;
- проведение необходимых бухгалтерских и экономических расчетов.

Для решения перечисленных задач ИС ЛПГП необходимо иметь систему телематики от удаленных источников (транспортные средства, агенты, брокеры, экспедиторы, терминалы, распределительные центры, грузоотправители, грузополучатели, подразделения транспортной компании и т.д.). Для надежной передачи и получения информации, а также сжатия ее объема с целью увеличения скорости передачи применяют комплекс алгоритмических процедур и программно-аппаратных средств. Повышение эффективности и минимизация аппаратных средств достигаются за счет

мультиплексирования сообщений и создания многосерверных информационных систем анализа информации [11].

Важными вопросами являются правильная установка датчиков и электронных систем для корректных измерений, а также правильность их подключения в бортовую сеть электрооборудования и электроники. Например, для минимизации помех необходимо, чтобы сопротивление между любой точкой массы транспортного средства и клеммой «-» аккумуляторной батареи не превышало 1 Ом. Провода питания «+» и «-» датчиков рекомендуется подключать в тех же точках бортовой сети, к которым подключены соответствующие провода устройства регистрации информации, они должны быть уложены в тот же жгут, что и штатная проводка транспортного средства.

При установке датчика нагрузки на ось необходимо, во-первых, правильно выбрать самую нагруженную ось (рис. 1), во-вторых, правильно рассчитать длину рычага и высоту тяги в зависимости от рабочего хода и типа подвески (рис. 2) [12]. В-третьих, для корректных измерений необходимо произвести тарировку системы методами взвешивания или погрузки мерных грузов. В заключение для защиты от несанкционированного подключения необходимо опломбировать электрические разъемы сигнального кабеля и разъемы датчика.

Важным является обеспечение стабильной передачи информации, поэтому GSM-антенну следует устанавливать снаружи на максимально возможной высоте для поддержания стабильной связи в районах с недостаточным уровнем сигнала приемно-передающей аппаратуры операторов сотовой связи [11].

Основой ИС являются базы данных [1, 7], образующие единое информационное пространство системы управления процессами. Создание и использование такого пространства обеспечивают единообразие, достоверность, полноту и высокое качество данных

для всех пользователей ИС и функциональных задач. Создание централизованной ИС с единой базой данных нерационально в силу специфики ЛПГП (территориальная разобщенность, разнородная информация, жесткое разделение задач по подразделениям и т.д.). Поэтому информационное пространство представляется в виде интегрированной системы локальных баз данных. При этом в каждой локальной базе данных собирается и хранится информация для решения определенных задач технико-экономического обеспечения функционирования ИС.

Особенностью ИС ЛПГП является наличие разнородного аппаратного и программного обеспечения (гетерогенность), что часто связано с продолжительным периодом ввода системы в эксплуатацию (по частям), периодическим (спонтанным) финансированием и многими другими факторами. Это обуславливает необходимость применения таких методов организации работы в системе, которые обеспечили бы пользователям простой доступ к локальным информационным ресурсам, независимо от аппаратной и программной платформ, на которых они установлены, а разработчикам прикладного программного обеспечения (ПО) предоставили бы возможность его переносимости и запуска на различных платформах.

В настоящее время применяется эффективный подход к построению подобных систем, который обеспечивает возможность учета особенностей транспортных систем сбора данных, средств вычислительной техники, используемой для реализации клиентских и серверных программ, и упрощает разработку прикладного ПО с использованием стандартных средств отладки, построения коммуникационной среды и аналитической сети, применение современных методов создания интегрированных систем баз данных. Данный подход позволяет повысить

надежность системы и снизить стоимость разработки [7].

Для выполнения сложных процессов обработки информации, поступающей от большого числа источников, входящих в сферу функционирования ИС ЛПГП, часто используются многосерверные (многомашинные) системы, реализованные в виде кластеров или сетевых систем.

Техническими аналогами подобных систем могут быть кластерные системы обработки запросов, маршрутизаторы и шлюзы телекоммуникационных систем, центры обработки информации, реализованные в виде многомашинных комплексов и/или локальной вычислительной сети [2, 4, 7].

При работе таких систем возникает задача управления потоками данных (запросов), поступающих в систему, предусматривающая распределение запросов между серверами (или электронными блоками управления транспортного средства), входящими в состав системы. Решением подобной задачи является оптимизация характеристик системы.

Ниже представлен математический подход к решению задачи, позволяющий оценить характеристики системы при различных стратегиях управления потоками запросов для управления логистическими процессами грузоперевозок с использованием современных систем электрооборудования и электроники. Результаты базируются на работах [5, 7–8, 10].

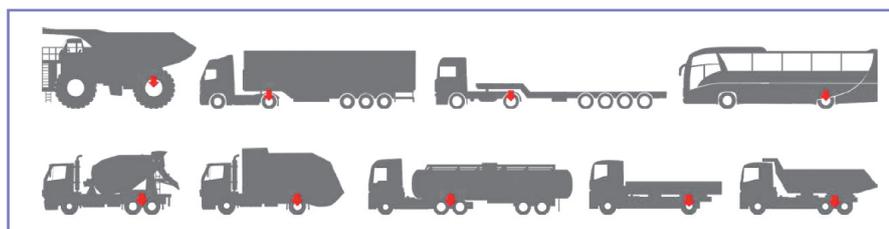


Рис. 1. Примеры наиболее нагруженных осей в зависимости от типа автотранспортных средств

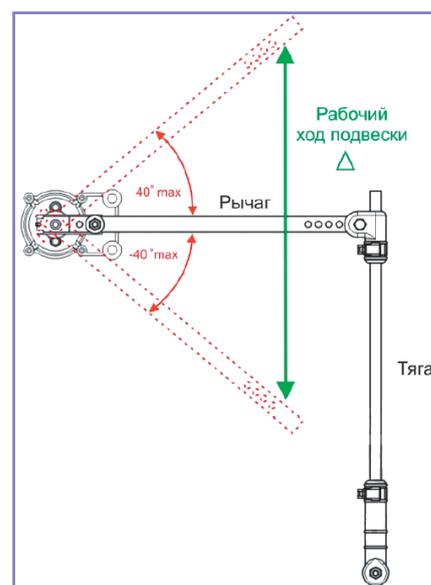


Рис. 2. Схема выбора длины рычага и высоты тяги при монтаже датчика нагрузки на ось ф. Технотон

Описание системы

Рассматривается информационная управляющая электронная система транспортных ЛППП, состоящая из N серверов и/или микропроцессорных блоков (обслуживающих устройств), на вход которой поступает поток запросов (поток сообщений) от M источников. Интенсивность потока запросов от источника номер $j - \lambda_j$. Запрос от источника j , поступивший на сервер номер i , встает в очередь на обработку. Длительность обработки этого запроса $-\infty > \beta_{ji} > 0$. Будем считать, что β_{ji} – случайная величина с функцией распределения $\beta_{ji}(t)$ и конечными первым и вторым моментами:

$$\infty > b_{1ji} = \int_0^{\infty} t d\beta_{ji}(t) > 0 \text{ и}$$

$$\infty > b_{2ji} = \int_0^{\infty} t^2 d\beta_{ji}(t) > 0.$$

Технология вычислений «Клиент – сервер» предусматривает распределение прикладной программы по двум компонентам, каждая из которых выполняет свои задачи. Одна из этих компонент – клиент, другая – сервер. Клиентская и серверная части программы могут быть реализованы как на одной, так и на разных электронных вычислительных машинах. Как правило, активный блок-клиент выдает запросы на пассивный сервер для выполнения какой-либо работы, а сервер обрабатывает запросы клиента и возвращает результат блоку-клиента.

Серверы осуществляют управление ресурсами ИС (базы данных, файлы данных, приложения, каналы связи, домены сети и пользователи).

Блоки-клиенты (устройства с дисплеем) или компьютеры пользователей ИС применяются для взаимодействия с данными и приложениями и выполняют следующие основные задачи:

- предоставление интерфейса пользователю для выполнения работы с данными в базе данных;
- отображение результатов исполнения запросов к базе данных;
- обработка результатов запросов к серверу базы данных.

Средствами передачи информации между клиентом и сервером являются сеть передачи данных и необходимое коммуникационное (сетевое) программное обеспечение.

Среди главных возможностей, предоставляемых пользователю и работнику программного обеспечения в системах, построенных по технологии

«Клиент – сервер», можно выделить работу в неоднородной вычислительной среде и распределенные вычисления [7].

В состав системы ИС ЛППП [1, 7] входит диспетчер сообщений, который в соответствии с заданным алгоритмом управления распределяет поступившие в систему сообщения между серверами, формируя частные потоки сообщений для серверов. Отметим, что функции диспетчеризации запросов могут быть распределены между серверами, в таком случае можно выделить виртуальный диспетчер. Таким образом, при любой форме реализации функции диспетчеризации запросов в системе выполняются.

Очевидно, что алгоритмы управления потоками запросов в большой степени определяют качество и скорость работы всей системы. В настоящее время известны и применяются на практике алгоритмы программного управления (не требующие учета состояния серверов) и алгоритмы адаптивного управления (учитывающие состояние серверов). Здесь под состоянием сервера будем понимать его загрузку, очереди запросов к серверу и время ожидания в очереди.

В дальнейшем будем рассматривать алгоритмы программного управления, поскольку они обладают рядом достоинств, таких как простота реализации, необходимость в минимальной информации о состоянии системы, возможность предварительной настройки по статистическим данным о параметрах системы (интенсивность входящего потока запросов и длительности их обслуживания на серверах).

Будем исследовать алгоритм управления, где поступающий запрос от источника номер j с вероятностью $1 \geq p_{ji} \geq 0$ направляется на сервер номер i . При этом управление потоком запросов задается стохастической матрицей

$$\mathbf{P} = \| p_{ji} \|, (j = 1, 2, \dots, M; i = 1, 2, \dots, N).$$

Для элементов матрицы выполняются следующие условия:

$$\text{для любого } j - \sum_{i=1}^N p_{ji} = 1;$$

$$\text{для любого } i - \sum_{j=1}^M p_{ji} > 0.$$

Первое условие означает, что каждый запрос распределяется по серверам, второе – на каждый сервер поступают запросы.

Характеристики системы

Среди множества характеристик выделим две группы.

1. Частные характеристики, которые относятся к конкретным серверам и источникам.

2. Интегральные (системные) характеристики, которые относятся ко всей системе в целом.

В нашем случае представляют интерес следующие частные характеристики:

- средняя длительность задержки запроса в очереди на узле номер $i - W_i$;
- средняя длина очереди из ожидающих запросов на узле номер $i - Q_i$;
- загрузка узла номер $i - p_i$;
- средняя длительность ожидания в очереди запроса источника номер $j - Z_{ji}$;
- средняя длительность ожидания в очереди запросов от источника номер j на узле номер $i - Z_{ji}$.

Интегральные характеристики, как правило, являются функциями от частных. В качестве интегральных будем рассматривать следующие характеристики:

- средняя величина временных затрат на пребывание запроса в системе

$$F_1(\mathbf{P}, \mathbf{B}(t), \lambda) = \sum_{j=1}^M \alpha_j \sum_{i=1}^N \lambda_j Z_{ji} + \sum_{j=1}^M \alpha_j \sum_{i=1}^N p_{ji} b_{1i}, \quad (1)$$

где λ_j – интенсивность потока запросов источника j , поступающих на сервер номер i ; α_j – весовой коэффициент, имеющий смысл величины затрат, связанных с пребыванием в системе в течение единицы времени запроса от источника номер j ;

$$\mathbf{B}(t) = \| B_{ji}(t) \|, (j = 1, 2, \dots, M; i = 1, 2, \dots, N) -$$

матрица, элементы которой – функции распределения длительностей обработки запросов; $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M)$ – вектор интенсивностей потоков запросов, поступающих от источников;

- средняя величина временных затрат, связанных с простоем серверов системы

$$F_2(\mathbf{P}, \mathbf{B}(t), \lambda) = \sum_{i=1}^N b_i (1 - \rho_i), \quad (2)$$

где b_i – весовой коэффициент, имеющий смысл величины затрат, связанных с простоем сервера номер i в течение единицы времени.

Часто целесообразно использовать характеристику, включающую первые две:

$$F(\mathbf{P}, \mathbf{B}(t), \lambda) = F_1(\mathbf{P}, \mathbf{B}(t), \lambda) + F_2(\mathbf{P}, \mathbf{B}(t), \lambda), \quad (3)$$

что позволяет решать задачи оптимизации, минимизируя значение этой характеристики по параметрам алгоритма управления Р.

Использование перечисленных характеристик дает возможность не только оценить качество работы многосерверной системы, но и определить оптимальные значения ее параметров. К основным относятся количество и производительность серверов, параметры алгоритма управления потоком запросов.

Математические модели для расчета характеристик системы

Используя матрицу Р и значения интенсивностей потоков запросов от источников, можно вычислить интенсивности потоков запросов, поступающих на серверы системы. Так, получим

$$\lambda_{ji} = \lambda_j p_{ji},$$

$$(j = 1, 2, \dots, M; i = 1, 2, \dots, N). \quad (4)$$

Интенсивность суммарного потока запросов, поступающих на сервер i , равна

$$\lambda_i = \sum_{j=1}^M \lambda_{ji}.$$

Поскольку каждый сервер работает автономно, его работу можно исследовать независимо от других серверов. Модель сервера в общем случае будет система массового обслуживания (СМО) типа М/Г/1/∞ [5]. При этом неограниченное число мест для ожидания в очереди соответствует реальному случаю, когда компьютер имеет достаточно большую буферную память для хранения передаваемых сообщений.

Дисциплина обслуживания очереди, которая может включать сообщения различных потоков, оказывает определяющее влияние на характеристики данной СМО. Возможны различные дисциплины, которые достаточно хорошо изучены, например, приоритетные, FIFO, LIFO и т.д. [3, 5].

В каждом случае можно вычислить требуемые частные характеристики (среднее время ожидания в очереди запросов j потока и загрузку обслуживающего устройства), что позволит определить значения интегральных характеристик для всей системы и выбрать наиболее подходящие параметры алгоритма управления потоками.

В дальнейшем будем считать, что обслуживание всех типов сообщений на каждом сервере происходит в порядке общей очереди, в которой запросы могут находиться сколь угодно долго.

Поступившие в систему запросы не теряются и после обслуживания мгновенно покидают ее.

Поскольку в систему поступают запросы от различных по типу источников, представляют интерес характеристики, связанные с каждым типом запросов. Исследование СМО с разнотипными запросами проводилось ранее, однако полученные результаты, например, в [3], недостаточно удобны для практического применения, поэтому предлагается более простой подход к анализу.

Рассмотрим отдельно поток запросов от источника номер i , поступающих на сервер номер j . Вероятность поступления k запросов от источника номер m в интервале между двумя запросами от источника номер j вычисляется при условии, что все потоки пуассоновские, по формуле

$$p_{km}(j, i) = \int_0^{\infty} \frac{(\lambda_{mi} t)^k}{k!} e^{-\lambda_{mi} t} dA_{ji}(t),$$

где $A_{ji}(t)$ – функция распределения длительности интервала между двумя последовательно поступающими запросами потока от источника номер j на сервер номер i .

Далее найдем преобразование Лапласа – Стильеса функции распределения длительности обслуживания (ДО) всех сообщений, поступивших от источника номер m на сервер номер i в интервале между поступлением двух последовательных запросов источника номер j на сервер номер i . Получим

$$\begin{aligned} \phi_{jmi}(s) &= \sum_{k=0}^{\infty} p_{km}(j, i) \beta_{mi}^k(s) = \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} \int_0^{\infty} \frac{(\lambda_{mi} t)^k \beta_{mi}^k(s)^k}{k!} e^{-\lambda_{mi} t} dA_{ji}(t) = \\ &= \int_0^{\infty} e^{-\lambda_{mi} t} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(\lambda_{mi} t \beta_{mi}(s))^k}{k!} dA_{ji}(t) = \\ &= \int_0^{\infty} e^{-\lambda_{mi} t (1 - \beta_{mi}(s))} dA_{ji}(t) = \\ &= \alpha_{ji}(\lambda_{mi}(1 - \beta_{mi}(s))), \end{aligned} \quad (5)$$

где $\alpha_{ji}(\cdot)$ и $\beta_{mi}(s)$ – преобразование Лапласа – Стильеса функции распределения для $A_{ji}(t)$ и $B_{mi}(t)$.

Теперь, используя (5), получим преобразование Лапласа – Стильеса функции распределения ДО всех запросов (от всех источников), поступивших в интервале между поступлением двух последовательных запросов источника номер j на сервер номер i . Имеем

$$\omega_{ji}(s) = \prod_{\substack{m=1 \\ m \neq j}}^M \phi_{jmi}(s). \quad (6)$$

Если рассматривать процесс обслуживания потока запросов только от одного источника j на одном сервере i , то ДО каждого запроса этого источника можно представить как сумму длительностей обслуживания самого запроса источника j и всех запросов от других источников, поступивших в интервале между поступлениями двух последовательных запросов источника j .

Для этого случая преобразование Лапласа – Стильеса функции распределения ДО запроса будет иметь вид

$$\begin{aligned} \beta_{ji}^*(s) &= \beta_{ji}(s) \omega_{ji}(s) = \\ &= \beta_{ji}(s) \prod_{\substack{m=1 \\ m \neq j}}^M \alpha_{ji}(\lambda_{mi}(1 - \beta_{mi}(s))). \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь величины λ_{mi} вычисляются по формуле (4). Из (7) получим, что средняя ДО одного запроса источника j на сервере i равна

$$\begin{aligned} b_{1ji}^* &= b_{1ji} + \frac{1}{\lambda_{ji}} \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq j}}^M \lambda_{mi} b_{1mi} = \\ &= \frac{1}{\lambda_{ji}} \sum_{m=1}^M \lambda_{mi} b_{1mi}. \end{aligned} \quad (8)$$

Теперь можно вычислить среднюю длительность ожидания в очереди на сервер i сообщениями источника j , рассматривая СМО типа М/Г/1/∞ для обслуживания запросов только от источника j :

$$Z_{ji} = \left(\frac{b_{2ji}^* \lambda_j p_{ji}}{2(1 - b_{1ji}^* \lambda_j p_{ji})} \right), \quad (9)$$

где $b_{2ji}^* = \frac{d^2 \beta_{ji}^*(s)}{ds^2} \Big|_{s=0}$.

Загрузка сервера номер i вычисляется по формуле

$$\rho_i = b_{1ji}^* \lambda_j p_{ji}. \quad (10)$$

Можно показать, что для любого j при $p_{ji} > 0$ формула (10) дает одинаковые значения ρ_i .

Среднее время ожидания в очереди в системе для запроса от источника номер j вычисляется по формуле

$$Z_j = \sum_{i=1}^N \frac{\lambda_{ji}}{\lambda_j} Z_{ji}. \quad (11)$$

Средняя длительность задержки произвольно взятого запроса в очереди на узле номер i может быть вычислена по формуле

$$W_i = \sum_{j=1}^M \frac{\lambda_{ji}}{\lambda_j} Z_{ji}. \quad (12)$$

Средняя длина очереди из ожидающих запросов на узле номер i вычисляется по формуле

$$Q_i = \sum_{j=1}^M \lambda_{ji} Z_{ji}. \quad (13)$$

Используя формулы (7–12), можно вычислить величину интегральных характеристик системы, которые задаются формулами (1) и (2).

Следует отметить, интегральные характеристики, задаваемые формулами (1) и (2), являются функциями от параметров алгоритма управления матрицы P , поэтому правомерна постановка задачи о нахождении оптимальных параметров управления, например, для характеристики, задаваемой формулой (1).

Дано: параметры оборудования системы (серверов) и потоков запросов $B(t)$, λ ; множество весовых коэффициентов (a_1, a_2, \dots, a_M) .

Найти:

$$\min_P \{F_1(P, B(t), \lambda) = \sum_{j=1}^M a_j \sum_{i=1}^N \lambda_{ji} Z_{ji} + \sum_{i=1}^M a_i \sum_{j=1}^N P_{ji} b_{ji}\}. \quad (14)$$

При ограничениях:

$$1) \text{ для любого } j=1, 2, \dots, M - \sum_{i=1}^N P_{ji} = 1;$$

$$2) \text{ для любого } i=1, 2, \dots, N - \sum_{j=1}^M P_{ji} > 0;$$

3) заданы подмножества номеров источников $J = \{j_1, j_2, \dots, j_{K_j}\}$ и номеров серверов $I = \{i_1, i_2, \dots, i_{K_i}\}$, для которых

$$P_{j_m i_l} = 1 \quad (m = 1, 2, \dots, K_j; l = 1, 2, \dots, K_i).$$

Ограничение 3 задает априорное распределение источников по серверам, что часто наблюдается на практике.

Данная задача является задачей математического программирования и может решаться известными методами, при этом ограничение 3 может значительно сократить число возможных вариантов.

Рассмотрим интегральную характеристику системы, заданную формулой (3). Применение этой характеристики, в отличие от первых двух, дает возможность решать задачу выбора оптимальных параметров управления и значения параметров серверов (например, средние значения длительностей обработки запросов от различных источников и на различных серверах). Эта задача выглядит следующим образом.

Дано: параметры потоков запросов λ ; множество возможных параметров серверов $B^*(t) = \{B_r(t)\}$, $r = 1, 2, \dots, R$; множества весовых коэффициентов (a_1, a_2, \dots, a_M) и (b_1, b_2, \dots, b_N) .

Найти:

$$\min_{P, B(t) \in B^*(t)} \{F(P, B(t), \lambda) = F_1(P, B(t), \lambda) + F_2(P, B(t), \lambda)\}. \quad (15)$$

При ограничениях:

$$1) \text{ для любого } j=1, 2, \dots, M - \sum_{i=1}^N P_{ji} = 1;$$

$$2) \text{ для любого } i=1, 2, \dots, N - \sum_{j=1}^M P_{ji} > 0;$$

3) заданы подмножества номеров источников $J = \{j_1, j_2, \dots, j_{K_j}\}$ и номеров серверов $I = \{i_1, i_2, \dots, i_{K_i}\}$, для которых

$$P_{j_m i_l} = 1 \quad (m = 1, 2, \dots, K_j; l = 1, 2, \dots, K_i).$$

Отметим, что в данном случае множество $B^*(t)$ определяется возможными характеристиками серверов, доступных разработчику системы. Задача также является задачей математического программирования и может решаться с применением известных методов.

Выводы

Для эффективного управления логистическими процессами необходимо уделять большое внимание электронным системам сбора данных и, в том числе, правильному выбору места размещения на транспортном средстве и электрическому способу подключения в бортовую сеть электрооборудования.

Полученные в ходе работы результаты дают возможность проводить анализ динамики алгоритмов диспетчеризации и управления потоками данных в многосерверных информационных системах ЛППП, вычислять характеристики алгоритмов как в установившемся режиме, так и в динамике.

Результаты работы могут быть полезны разработчикам и администраторам информационных управляющих систем различного назначения, специалистам в области телематики и грузоперевозок.

Литература

1. Вихров Н. М., Нырклов А. П. Модели технологических процессов на транспорте. – М.: Судостроение, 2002. – 422 с.
2. Ретано А., Слайс Д., Уайт Р. Принципы проектирования корпоративных IP-сетей. Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2002. – 368 с.
3. Рыжиков Ю. И. Беспriorитетное обслуживание неоднородного потока заявок // Техническая кибернетика, 4, 1975. – С. 69–73.
4. Таненбаум Э., Ван Стен М. Распределенные системы. Принципы и парадигмы. – СПб.: Питер, 2003. – 877 с.

5. Саксонов Е. А., Нгуен Динь Чунг, До Чунг Тхоай, Нгуен Ксуан Фюонг. Модели и алгоритмы управления потоками данных в многосерверных информационных системах // Системы управления и информационные технологии, 2011, № 1.1 (43), с. 56–59.

6. Тихомиров М. В., Фам Динь Тьк, Нгуен Динь Чунг, Ву Ван Чыонг. Методика обеспечения показателей безотказности и долговечности радиоэлектронных средств на основе комплексного моделирования физических процессов // Успехи современной радиоэлектроники, 2011, № 1, с. 25–34.

7. Болнокин В. Е., Нгуен Н. Хуэ, Нгуен Д. Чунг. Модели управления мультимодальными контейнерными транспортно-складскими комплексами. – М.: ИИнтелЛ, 2011. – 256 с.

8. Болнокин В. Е., Мутир Д. И., Нго Ан Туан. Математические модели управления судовыми транспортными системами. – М.: Перо, 2015. – 232 с.

9. Бутов А. С., Гаскаров Д. В., Егоров А. Н., Крупенин Н. В. Транспортные системы. Моделирование и управление. – СПб.: Судостроение, 2001. – 554 с.

10. Комаров В. В. Архитектура и стандартизация телематических и интеллектуальных транспортных систем. Зарубежный опыт и отечественная практика / В. В. Комаров, С. А. Гараган. – М.: НТБ «Энергия», 2012. – 352 с.

11. Асмолов Г. И., Рожков В. М., Соколов В. Г. Виды информации и датчики в системах транспортной телематики. Учебное пособие. – М.: МАДИ, 2008. – 74 с.

12. Датчики нагрузки на оси. Руководство по эксплуатации: [Электронный ресурс] // Технотон. Минск, 2015. URL: http://t-msk.ru/myfiles/rukovodstva/GNOM_rukovodstvo_po_ekspluatcii_v_2.0.pdf. (дата обращения: 28.02.2017).

Болнокин Виталий Евгеньевич

Родился в 1953 году. В 1975 году окончил Донецкий государственный университет по специальности «Математика». Доктор технических наук, профессор. В 1988 году защитил диссертацию по теме «Исследование и проектирование систем гибкого управления робототехническими комплексами». Опыт работы – 42 года. В настоящее время работает советником Дирекции ФГУП НИИАЭ. Автор более 100 научных статей и монографий.

Нгуен Динь Чунг

Родился в 1965 году. В 1987 году окончил экономико-инженерный факультет Национального транспортного морского университета Вьетнама. Кандидат технических наук, доцент. В 2011 году защитил диссертацию по теме «Модели управления мультимодальными

ми контейнерными транспортно-складскими комплексами». Опыт работы – 30 лет. В настоящее время работает главным специалистом Национального управления морским транспортом, Вьетнам. Автор более 40 научных статей и монографий.

Феофанов Сергей Александрович

Родился в 1984 году. В 2005 году окончил МАДИ (ГТУ) по специальности «Электрооборудование автомобилей и тракторов». Кандидат технических наук, защитил диссертацию по теме «Электрические пусковые системы в бортовой сети электрооборудования автомобилей с номинальным напряжением 36 В». Опыт работы – 11 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры «Электротехника и электрооборудование» МАДИ. Имеет 14 научных трудов и 1 патент на изобретение.

Bolnokin Vitaliy

Was born in 1953. In 1975 he graduated Donetsk State University majoring in «Mathematics». He is Doctor of Technical Sciences, professor. In 1988 he defended the dissertation with subject «Research and design of flexible control systems by the robotic complexes». He has 42 years of work experience. At present he works as Advisor of Direction of Scientific Research and Experimental Institute of Automotive Electronics and Electrical Equipment. He is author of more than 100 scientific articles and monographs.

Nguyen Dinh Chung

Was born in 1965. In 1987 he graduated from faculty of economics and engineering of National Transport Maritime University of Vietnam. He is Candidate of Technical Sciences, associate professor. In 2011 he defended the dissertation with subject «Models of management of multimodal

container transport-warehouse complexes». He has 30 years of work experience. At present he works as Chief Specialist of State Agency of Maritime University, Vietnam. He is author of more than 40 scientific articles and monographs.

Feofanov Sergey

Was born in 1984. In 2005 he graduated from Moscow Automobile and Road Construction State Technical University majoring in «Electric equipment of automobiles and tractors». He is Candidate of Technical Sciences, he defended the dissertation with subject «Electrical start-up systems in the on-board electrical equipment network of automobiles with a rated voltage of 36 V». He has 11 years of work experience. At present he works as associate professor of «Electrical engineering and electrical equipment» of Moscow Automobile and Road Construction State Technical University. He has 14 academic papers and one patent of invention.

Синтез и анализ работы вычислителя скорости вентильного двигателя

// Synthesis and analysis of valve engine speed calculator //

**Доманов В. И., к.т.н.,
Доманов А. В., к.т.н.,
Альтахер Аббас А. Карим,
ФГБОУ ВО «УлГТУ», г. Ульяновск**

*В статье рассматривается работа схемы вычисления сигнала скорости вентильного двигателя на основе сигналов датчика положения ротора. Анализируются ошибки, связанные с работой схемы вычислителя. Определяются возможности снижения ошибок, вызванных различными факторами. **Ключевые слова:** вентильный двигатель, датчик положения ротора, вычислитель сигнала скорости, ошибка.*

Развитие техники требует создания устройств и механизмов с более высокими технико-экономическими показателями. В области электропривода наиболее полно соответствуют указанным требованиям вентильные двигатели (ВД). Они обладают хорошими энергетическими и электромеханическими характеристиками и высокой надежностью.

Современный электропривод на основе вентильного двигателя является сложным элементом мехатроники, включающим сам двигатель, датчик положения ротора или его вычислитель, силовой электронный преобразователь, систему управления, датчики или вычислители координат. Расширяются области применения этих электроприводов, повышаются требования к их работоспособности, возрастает объем выпуска подобных машин. Поэтому создание современного высокоэффективного вентильного электропривода является актуальной задачей [1].

Рассматриваемый электропривод ВД содержит синхронную машину (СМ) и синусно-косинусный датчик положения ротора (ДПР). Статорные обмотки СМ подключены к выходам двухканального усилителя-преобразователя, входы которого подсоединены к выходам коммутатора на аналоговых умножителях.

*Considered the operation of the circuit for calculating a signal speed of the engine valve on the basis of the rotor position sensor signals. Analyzes the errors associated with the operation of the calculator circuit. Determines the possibility of reducing errors caused by various factors. **Keywords:** valve motor, rotor position sensor, speed signal calculator, fault.*

Работой коммутатора управляют сигналы с ДПР [2]. Рассмотрим структуру вычислителя скорости (рис. 1).

Сигналы с ДПР будут изменяться в соответствии с выражениями

$$\begin{aligned} U_1 &= U_\delta \cdot \sin \alpha(t), \\ U_2 &= U_\delta \cdot \cos \alpha(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где U_δ – амплитуда сигнала ДПР.

Мгновенное значение угловой скорости вращения вала двигателя под действием момента $M_{об}$ определяется выражением

$$\omega(t) = \frac{\partial \alpha(t)}{\partial t}. \quad (2)$$

Дифференцирование сигналов (1) с учетом (2) дает значения

$$E_1 = K_\delta \cdot U_\delta \cdot \omega \cdot \cos \alpha(t)$$

$$E_2 = -K_\delta \cdot U_\delta \cdot \omega \cdot \sin \alpha(t),$$

где K_δ – коэффициент передачи дифференциаторов. Полученные сигналы E_1 и E_2 несут информацию об угловой скорости $\omega(t)$ вращения вала двигателя, но промодулированы знакопеременными тригонометрическими функциями углового перемещения $\cos \alpha(t)$ и $\sin \alpha(t)$ [3]. Эти составляющие в условиях безредукторного следящего электропривода (низкие и инфранизкие частоты, малые угловые перемещения $\Delta\alpha$) имеют специфические свойства, и отфильтровать их традиционными способами (например, RC-фильтрами) практически невозможно.

На входы первого умножителя M_1 поступают сигналы E_1 с первого дифференциатора и U_2 с ДПР, а на входы второго умножителя M_2 – сигналы E_2 со второго дифференциатора и U_1 с ДПР. Выходные сигналы U_{y1} и U_{y2} первого и второго умножителей имеют следующие значения:

$$U_{y1} = K_c \cdot \omega \cdot \cos^2 \alpha(t),$$

$$U_{y2} = K_c \cdot \omega \cdot \sin^2 \alpha(t),$$

где $K_c = K_\delta \cdot U_\delta^2$ – коэффициент передачи по угловой скорости.

Сигналы U_{y1} и U_{y2} с умножителей поступают на входы сумматора, выходной

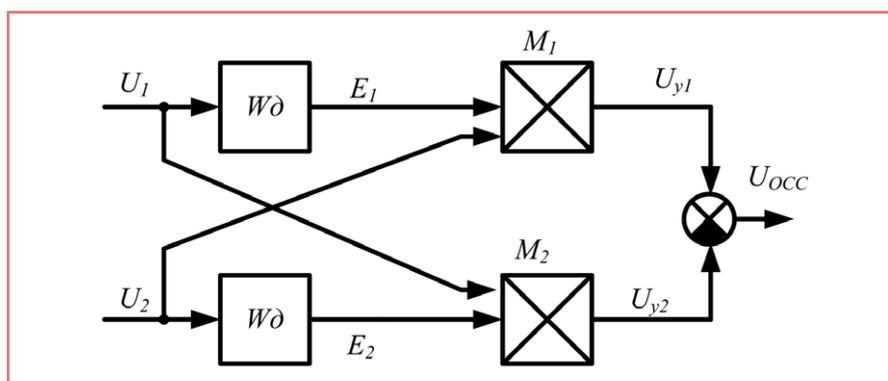


Рис. 1. Структура вычислителя скорости

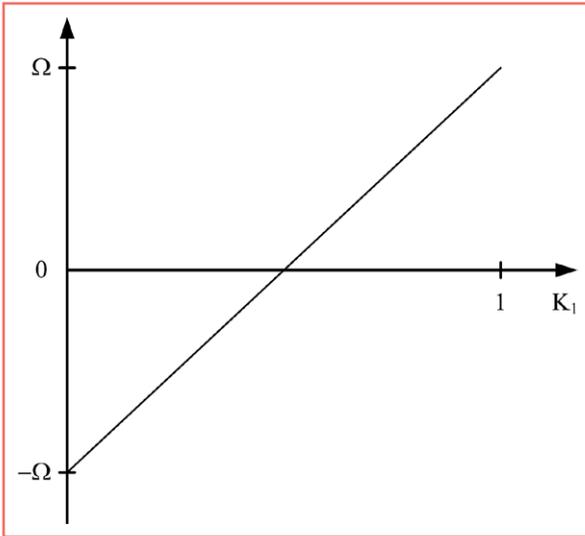


Рис. 2. Изменение сигнала вычислителя скорости в зависимости от K_1

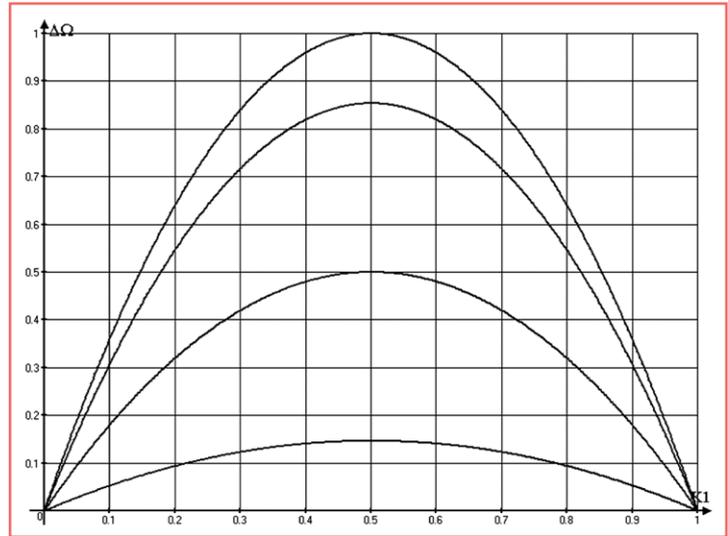


Рис. 3. Зависимости ошибки вычислителя скорости от K_1 для различных значений a

сигнал U_{occ} которого является сигналом отрицательной обратной связи по угловой скорости и имеет значение (с учетом того, что $\cos^2\alpha + \sin^2\alpha = 1$)

$$U_{occ} = U_{y1} - U_{y2} = K_c \cdot \omega.$$

Скоростная обратная связь имеет линейную характеристику, высокую надежность и не имеет каких-либо ограничений по быстродействию и скорости [4].

Точность работы вычислителя скорости будет зависеть от ряда условий:

- точность установки ДПР;
- наличие высших гармоник в сигналах датчика;
- влияние случайных помех.

Оценим каждое из указанных условий. В случае неточной установки ДПР оси координат датчика и двигателя будут отличаться. При этом двигатель будет воспринимать сигналы датчика в виде

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= K_1 \sin \alpha t + K_2 \cos \alpha t \\ U_2 &= K_1 \cos \alpha t + K_2 \sin \alpha t \\ K_1 + K_2 &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

В соответствии с выражением (2) и с учетом формул (3) получаем

$$\Omega_1 = (K_1^2 - K_2^2) \frac{d\alpha}{dt}. \quad (4)$$

Найдем ошибку по скорости для этого случая:

$$\Delta\Omega = \frac{\Omega_0 - \Omega_1}{\Omega_0} = 2(1 - K_1). \quad (5)$$

Анализ выражения (5) показывает, что $\Delta\Omega = 0$ при условии $K_1 = 1$ (точная установка ДПР). При условии $K_1 = 0$ $\Delta\Omega = 2$

$$U_1 = \cos \alpha t, \quad U_2 = \sin \alpha t. \quad (6)$$

Исходя из уравнений (6) получаем $\Omega = -\Omega_0$. Таким образом, при смещении осей ДПР на 90 электрических градусов сигнал вычислителя скорости меняет знак (рис. 2).

При наличии высших гармоник в сигналах ДПР и с учетом снижения уровня гармоник старших порядков в первом приближении можно записать

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= K_1 \sin \alpha t + K_2 \sin 2\alpha t \\ U_2 &= K_1 \cos \alpha t + K_2 \cos 2\alpha t \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

С учетом выражения (7) можно определить ошибку по скорости в этом случае:

$$\Delta\Omega = 2K_1(1 - K_1)(1 - \cos \alpha). \quad (8)$$

Анализ выражения (8) показывает, что $\Delta\Omega = 0$ в двух случаях:

$K_1 = 1$, отсутствуют высшие гармоники;

$K_1 = 0$, на обмотках датчика имеется только вторая гармоника.

Максимальная ошибка достигается при условии $K_1 = 0,5$ (рис. 3).

Рассмотрим вариант, при котором в напряжениях ДПР присутствует случайный сигнал $S(\omega)$:

$$\left. \begin{aligned} U_{1S} &= U_1 + S(\omega) \\ U_{2S} &= U_2 + S(\omega) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

С учетом выражений (1) и (7) можно вычислить ошибку по скорости для этого случая:

$$\Delta\Omega = 2 \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{4} \right) \times \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{4} \right) \left[\Omega S(\omega) + \frac{dS(\omega)}{dt} \right]. \quad (10)$$

Анализ выражения (10) показывает, что эта ошибка может быть отфильтрована апериодическим звеном с постоянной времени $T = 1/\omega$.

Выводы

Условия снижения ошибок в работе вычислителя скорости вентильного двигателя:

- ДПР необходимо устанавливать максимально точно;
- питание ДПР не должно иметь высших гармоник, для чего можно использовать фильтры питания;
- для снижения влияния случайных помех можно применить фильтр на выходе вычислителя.

Анализ ошибок вычислителя и путей их снижения позволяет создать электропривод с более высокими точностными показателями.

Литература

1. Анучин А.С. Системы управления электроприводов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – 373 с.
2. Афанасьев А.Ю. Моментный электропривод. – Издательство Казанского государственного технического университета, 1997. – 250 с.
3. Доманов В.И. Разработка и исследование систем электропривода с вентильными двигателями / В.И. Доманов, А.В. Доманов. – Ульяновск: УлГТУ, 2015. – 194 с.
4. Доманов В.И. Элементы систем автоматики (канал управления) / В.И. Доманов, А.В. Доманов. – Ульяновск: УлГТУ, 2009. – 107 с.

Доманов Виктор Иванович

Родился в 1950 году. В 1972 году окончил Ульяновский политехнический институт по специальности «Авиаприборостроение». В 1980 году защитил кандидатскую диссертацию по теме «Методика расчета и исследования следящих систем с устройствами упреждающей коррекции для токарных станков с ЧПУ». Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» энергетического факультета УлГТУ. Имеет 144 научных труда, автор 16 изобретений.

Доманов Андрей Викторович

Родился в 1976 году. В 1999 году окончил Ульяновский государственный технический университет по специальности «Измерительно-вычислительные комплексы и системы». В 2002 году защитил кандидатскую диссертацию по теме «Разработка и исследование электроусилителя рулевого управления легковых автомобилей на основе бесконтактных

двигателей». Кандидат технических наук, доцент, директор Экспертно-аналитического центра НИТИ им. С.П. Капицы УлГУ. Имеет 107 научных трудов, автор 11 изобретений.

Альтахер Аббас А. Карим

Родился в 1971 году. В 2006 году окончил Технологический институт в Багдаде (Ирак). Аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» энергетического факультета УлГТУ. Имеет публикации в области электромеханики.

Domanov Viktor

Was born in 1950. In 1972 he graduated from Ulyanovsk Polytechnic Institute specializing in «Aircraft instrumentation». In 1980 has protected Ph. D. thesis by the theme «The method of calculation and research tracking systems with pre-emptive corrective devices for lathes numerically controlled». Ph. D., docent, Head of Department «Electric drives and automation of industrial installations» in Ulyanovsk State Tech-

nical University. He has 144 scientific publications, author of 16 inventions.

Domanov Andrey

Was born in 1976. In 1999 he graduated from Ulyanovsk State Technical University specializing in «The measuring-computing complexes and systems». In 2002 has protected Ph. D. thesis by the theme «Development and investigation of electrical power steering of passenger cars on the basis of contactless engines». Ph. D., docent, Director of Expert-Analytical Center SRTI of Ulyanovsk State University. He has 107 scientific publications, author of 11 inventions.

Altaher Abbas A. Karim

Was born in 1971. In 2006 he graduated from Institute of Technology in Baghdad (Iraq). Post-graduate of the Department «Electric drives and automation of industrial installations» in Ulyanovsk State Technical University. He has published articles in the field of electrical engineering.

Автомобильный многопозиционный датчик положения

// Automotive multi-position sensor //

**Нефедьев А. И., д.т.н., доцент,
Волгоградский государственный технический
университет, г. Волгоград**

**Шаронов Г. И., к.т. н., доцент,
Автомобильно-дорожный институт Пензенского государственного
университета архитектуры и строительства, г. Пенза**

Проведен анализ схемотехнических решений автомобильных многопозиционных датчиков положения. Разработан многопозиционный датчик положения для автомобиля, обладающий высокой точностью и надежностью. Представлены конструкция и параметры автомобильного многопозиционного датчика положения.

Ключевые слова: датчик положения, микропроцессорная система управления, первичный параметрический преобразователь, вторичный преобразователь.

The analysis of circuit design multiple of automotive position sensors was performed. The multiple position sensors for cars with high precision and high reliability was developed. The design and performance of automotive multiple position sensor was presented.

Keywords: position sensor, microprocessor control system, primary parametric transducer, secondary transducer.

В настоящее время в автомобилях применяются микропроцессорные системы управления различными подсистемами и агрегатами: двигателем, коробкой переключения передач, системой динамической стабилизации, круиз-контролем, тормозной и противобуксовочной системами. Для получения информации о состоянии узлов и подсистем автомобиля в любой момент времени разрабатываются и применяются различные автомобильные аналоговые датчики. Такие датчики, являющиеся неотъемлемой частью практически любой автомобильной системы управления, должны отвечать растущим потребностям автомобилестроения с точки зрения надежности, линейности, прецизионности, компактности и невысокой цены и функционировать в жестких условиях эксплуатации при повышенной и пониженной температурах, сильном загрязнении, вибрации и высокой влажности.

Из бесконтактных датчиков наиболее подходящими для применения в автомобиле являются индуктивные, характеризующиеся простотой изготовления, неприхотливостью в отношении

внешних условий и долговечностью. Индуктивные датчики широко применяются в различных областях промышленности, в том числе в автомобилестроении, что обусловлено их надежностью, сравнительно низкой стоимостью, бесконтактным принципом действия, неограниченным сроком службы и высокой разрешающей способностью, возможностью работы в широком диапазоне температур. При этом технология их производства непрерывно совершенствовалась различными фирмами. Благодаря функциональным и конструктивным технологическим усовершенствованиям, а также развитию электроники индуктивные датчики остаются востребованными в автоиндустрии [1–3].

Автомобильные индуктивные датчики производятся многими фирмами: Schaevitz Sensors Div., Active Sensors Ltd, HBM GmbH, Trans-Tek Inc., Honeywell Sensotec, Schaevitz Sensors, Lord Microstrain, P3 America, Penny & Giles Controls Ltd, RDP Electronics Ltd, Automatic Systems Laboratories, Solartron Metrology, Ametek, Inc., Columbia Research Lab's, Kavlico Corporation, Lion Precision, Monitran Ltd,

Revolution Sensor Company, Sentech Inc., Instruments & Control Inc. и многими другими [4].

Нередко в автомобиле осуществляется контроль линейного перемещения различных объектов, для чего удобно применять индуктивные датчики, которые хорошо подходят для регистрации линейного движения объектов и могут быть использованы вместо датчиков Холла [5–8].

Микропроцессорной системе управления силовым агрегатом требуется достоверная информация о положении исполнительного механизма переключения передач, состоянии сцепления, рейки топливного насоса высокого давления и т.д. Для решения этой задачи разработан многопозиционный датчик положения, предназначенный для получения в цифровом виде информации о положении, направлении и величине перемещения контролируемого объекта, принцип работы которого основан на преобразовании параметров датчика (комплексных сопротивлений или взаимной индуктивности) в активный сигнал. Такой многопозиционный датчик положения имеет относительно низкую себестоимость и высокую надежность и может использоваться в системах автоматизации во многих отраслях промышленности.

На рис. 1 представлена структурная схема разработанного многопозиционного датчика положения, состоящего из первичного параметрического преобразователя (ППП) и вторичного преобразователя (ВП) [9].

При подаче напряжения с выхода источника гармонического сигнала E на катушки ППП по ним протекает ток, значение которого зависит от модулей комплексного сопротивления катушек. Напряжение, формируемое катушками $L1$ и $L2$, поступает на вход выпрямителей $B1$ и $B2$, после фильтрации при помощи фильтров $\Phi1$ и $\Phi2$ подается на входы

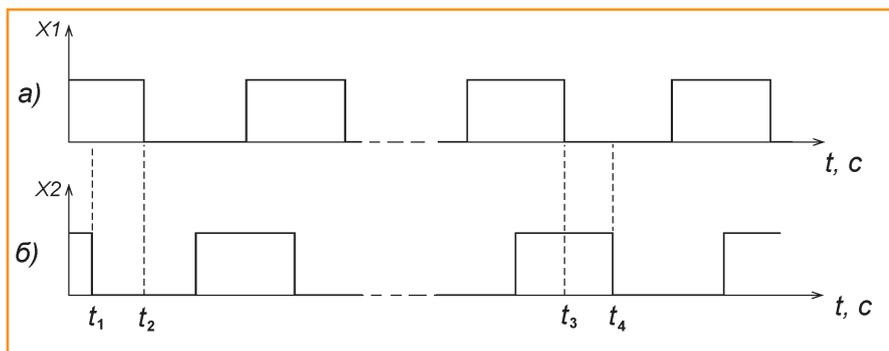


Рис. 3. Временные диаграммы выходных сигналов датчика положения: а) информационный выход X1; б) информационный выход X2

чтобы расстояние a (рис. 2а) между первой L1 и второй L2 катушками удовлетворяло одному из следующих условий:

- если $b \geq c$, то $\text{mod}(a, (b + c)) > b$ или $\text{mod}(a, (b + c)) < c$, где $\text{mod}(a, (b + c))$ – остаток от деления a на $(b + c)$;

- если $b < c$, то $\text{mod}(a, (b + c)) > c$ или $\text{mod}(a, (b + c)) < b$.

На рис. 3 представлены временные диаграммы выходных сигналов на информационных выходах X1 и X2 многопозиционного датчика положения. При перемещении штока датчика влево переход с уровня «1» на уровень «0» (рис. 3, момент времени t_1) на информационном выходе X2 происходит, когда на информационном выходе X1 присутствует сигнал с уровнем «1». Аналогично переход при данном условии с уровня «1» на уровень «0» (рис. 3, момент времени t_2) на информационном выходе X1 происходит, когда на информационном выходе X2 присутствует сигнал уровня «0». При перемещении штока датчика вправо происходит изменение указанного соответствия. Так, переход с уровня «1» на уровень «0» (рис. 3, момент

времени t_3) на информационном выходе X1 происходит, когда на информационном выходе X2 присутствует сигнал уровня «1». Аналогично переход с уровня «1» на уровень «0» (момент времени t_4) на информационном выходе X2 происходит, когда на информационном выходе X1 присутствует сигнал уровня «0».

Фотография разработанного автомобильного многопозиционного датчика положения показана на рис. 4.

Основные параметры разработанного многопозиционного датчика положения:

первичный измерительный преобразователь (ПИП):

- диаметр, мм 22;
- длина корпуса, мм 40;
- длина индуктора определяется величиной перемещения контролируемого объекта;

вторичный измерительный преобразователь (ВИП):

- минимально возможное контролируемое перемещение, мм 1;
- напряжение логической единицы, В 4,2;

- напряжение логического нуля, В 0,1;
- токовый сигнал низкого уровня, мА, не более 0,3;
- токовый сигнал высокого уровня, мА, не более $10 \pm 1,5$;
- напряжение питания, В 12–24;
- диапазон рабочих температур, °C $-50 \dots +95$;
- воздействие воздуха давлением, МПа, не более 1;
- максимальная погрешность позиционирования при изменении температуры от -50 до $+95$ °C, мм, не более $\pm 0,13$.

Подключение датчика к внешним электрическим устройствам осуществляется гибким кабелем. Со стороны датчика кабель заделан неразъемно, при этом длина кабеля составляет 1 м.

Разработанный автомобильный многопозиционный датчик положения применен в составе автоматической системы управления силовым агрегатом автобуса ЛиАЗ-5256 для обеспечения контроля положения и направления перемещения рейки топливного насоса высокого давления и датчика положения педали акселератора, а также выбора и включения передачи в коробке переключения передач.

Литература

1. Scott D. Welsby. Capacitive and Inductive Noncontact Measurement // Sensors Magazine. March, 2003.
2. Nyce D. S. The LVDT: A Simple and Accurate Position Sensor // Sensors Magazine. Aug., 2005.
3. Литвиненко В. В. Автомобильные датчики, реле и переключатели. Краткий справочник / Литвиненко В. В., Майструк А. П. – М.: За рулем, 2004. – 176 с.
4. Криворученко А. Бесконтактные датчики положения. Проблемы выбора и практика применения // Компоненты и технологии, № 1, 2007. – С. 32–35.
5. US Patent № 6563412, МПК H01F 21/04. Rotary variable differential transformer. Опубликовано. 13.05.2003.
6. US Patent № 7287512, МПК F02D 11/04, B62K 21/12. Throttle position sensor / Possehl et al. Опубликовано. 30.10.2007.
7. US Patent № 7538543, G01R 33/06. Redundant pedal position sensor / Nicolosi J. M. Опубликовано. 26.05.2009.
8. Нефедьев А. И. Прецизионный трансформаторный измеритель перемещения / Нефедьев А. И., Шаронов Г. И., Шаронова В. Г. // Проблемы качества и эксплуатации автотранспортных средств: материалы VIII международной научно-технической конференции, г. Пенза,

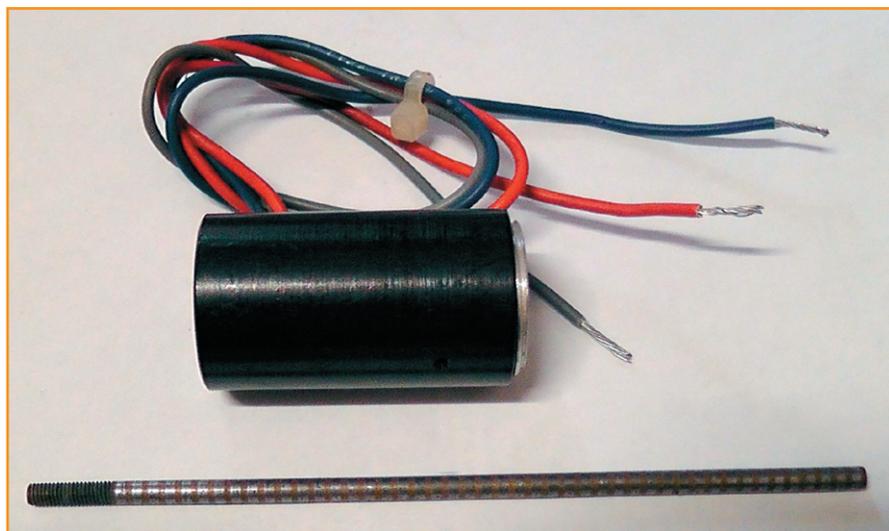


Рис. 4. Автомобильный многопозиционный датчик положения

21–23 мая 2014 г. / под общ. ред. Э. Р. Домке; ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства», Автомобильно-дорожный институт. – Пенза, 2014. – С. 359–362.

9. Патент РФ № 2248579, МПК G01R 27/28. Датчик для многопозиционного контроля положения / Шаронов Г. И., Кучерук В. А., Ширшиков А. С., Домке Э. Р., Родионов Ю. В. – № 2003113817/28, заявл. 12.05.2003; опубл. 30.03.2005. Бюл. № 8.

Нефедьев Алексей Иванович

Родился в 1965 году. В 1987 году окончил Пензенский политехнический институт по специальности «Радиотехника». Доктор технических наук, доцент. В 2013 году защитил диссертацию по теме «Широкодиапазонные электростатические и электродинамические компараторы переменного тока для измерений электроэнергетических величин». Опыт работы – 30 лет. В настоящее время работает профессором кафедры «Электротехника» Волгоградского государственного технического университета. Имеет 132 публикации, в том числе 34 авторских свидетельства и патента.

Шаронов Геннадий Иванович

Родился в 1947 году. В 1972 году окончил Пензенский завод – ВТУЗ при заводе ВЭМ, филиал Пензенского политехнического института по специальности «Автоматика и телемеханика». Кандидат технических наук, доцент. В 1992 году защитил диссертацию по теме «Разработка средств измерения параметров пассивных двухполюсников в многополюсных электрических цепях на основе алгоритма изменения конфигурации измерительной цепи». Опыт работы – 51 год. В настоящее время работает доцентом кафедры «Организация и безопасность движения» Автомобильно-дорожного института Пензенского государственного университета архитектуры и строительства. Имеет 249 публикаций, в том числе 176 авторских свидетельств и патентов.

Nefed'ev Alexey

Was born in 1965. In 1987 he graduated from Penza State University in specialty of «Radio-technics». He is candidate of technical sciences, associate professor. In 2013 he defended the thesis, the subject of thesis is «Wide-range electrostatic and electrodynamic comparators

of alternate current for measurement of the electrical energy values». He has 30 years work experience. At present, he works as a professor of the «Electrical technology» department of Volgograd State Technical University. He has 132 academic papers, including 34 certificates of authorship and patent.

Sharonov Gennady

Was born in 1947. In 1972 he graduated from Penza factory – VTUZ under VEM factory, branch of Penza Polytechnic Institute, speciality is «Automatics and telemechanics». He is candidate of technical sciences. In 1992 he defended the thesis, the subject of the thesis «The development of tools for measuring the parameters of passive two-terminal circuit in multi-pole electrical circuits on the basis of the reconfiguration of algorithm of the measurement circuit». He has 51 years work experience. At present, he is associate professor of the «Organization and traffic safety» department of Automobile and Roads Institute of Penza State University of Architecture and Construction (Penza). He has 249 academic papers, including 176 certificates of authorship and patents.

Анализ подходов и имитационное моделирование при разработке и реализации электротехнической системы мониторинга состояния комплекса электроснабжения беспилотного автомобиля

// Analysis of approaches and simulation modeling in the development and implementation of an electrical monitoring system of the unmanned vehicle power supply complex //

Козловский В. Н., д.т. н.,
Новикова А. П.,
СамГТУ, г. Самара

В работе представлены результаты анализа основных методов и методик организации системы мониторинга работоспособности комплекса электроснабжения автономного транспортного объекта по критерию сопротивления изоляции шин.

Ключевые слова: автомобиль, электроавтомобиль, автомобиль с комбинированной энергоустановкой, электрооборудование, электроснабжение, диагностика работоспособности.

Анализ ключевых тенденций развития мировой автомобильной промышленности с учетом непрерывного расширения и роста значимости системы электрооборудования в новых проектах электромобилей (ЭМБ) и автомобилей с комбинированной энергоустановкой (АКЭУ), автономных транспортных объектов (АТО) позволяет говорить об актуальности задачи обеспечения исправной работы изоляции комплекса электропитания (ЭКЭП). Становится очевидной важная научно-техническая проблема создания соответствующей электротехнической и электронной диагностической системы мониторинга работоспособности с целью обеспечения высоких показателей надежности современных автотранспортных средств (АТС) [1].

Проведенный патентный анализ (за последние 20 лет) по вопросам теории, прикладным аспектам разработки и внедрения электротехнических систем мониторинга работоспособности транспортных объектов показал, что на данный момент существуют несколько методов мониторинга работоспособности АТС [2].

Анализ научных материалов в области объекта исследования показал, что

The work presents the results of an analysis of the main methods and techniques of the organization of operability monitoring system of an electrical supply complex of an autonomous transport facility by the criterion of tire insulation resistance.

Keywords: automobile, electro mobile, automobile with combined power plant, electric facility, power supply, operability diagnostics.

методы и способы мониторинга сопротивления системы электропитания в значительной степени разработаны для космических аппаратов в работах В. И. Лачина, М. Е. Бородянского, И. М. Бородянского, Ю. М. Соломенцева, Ю. В. Краснобаева, для летательных аппаратов – в трудах В. В. Серебрякова, И. И. Абрамова, В. К. Ванина, Б. Д. Дунаева, Э. И. Капля, В. В. Кичаева, С. В. Кононова, С. И. Малафеева, О. А. Марковской, А. И. Покрашенко, Н. В. Серебренникова, В. А. Савельева, С. Н. Слезкина, Л. З. Фейгина.

Более детально вопросы разработки и исследования мониторинга работоспособности в автотранспортных средствах рассмотрены в работах С. В. Акимова, В. А. Балагурова, В. В. Болотина, Ю. А. Купеева, Б. И. Петленко, В. Е. Ютта, R. A. Fisher, F. R. Sghleif, E. V. Curdts.

Первичный анализ выделенных подходов, проведенный с целью выбора наиболее перспективных для организации системы мониторинга, показывает некоторую неочевидность предпочтений при рассмотрении каждого из методов по отдельности. Например, при реализации системы на основе мостовых методов возникают проблемы с быстродействием

и значительной погрешностью оценки работоспособности комплекса. Динамический метод обладает важным достоинством – простотой реализации технических решений, но при этом у него те же недостатки, что и у мостовых методов. При рассмотрении методов непосредственной оценки работоспособности к указанным выше недостаткам добавляются еще и сложность технической реализации, а также необходимость введения компенсационного источника в систему, что делает невозможным применение данной группы методов.

Существование множества технических устройств для измерения сопротивления изоляции шин питания относительно корпуса и токов утечки обусловлено сложностью задачи. Это свидетельствует и о том, что в настоящее время не созданы универсальные средства с приемлемыми характеристиками для данного класса объектов – низковольтных разветвленных цепей постоянного тока и, в частности, ЭКЭП АТО с двумя изолированными от корпуса шинами питания.

Необходимо отметить, что большинство методов оценивается качественно и для них, как правило, отсутствуют количественные оценки и абсолютные значения погрешностей и быстродействия. Это подтверждается и отсутствием аналитически выверенных методик для оценки погрешностей при подсчете сопротивлений по измеренным данным. Кроме того, функционал перечисленных методов не решает задачу оценки критического состояния АТО.

Именно поэтому нами проводится имитационное моделирование процесса мониторинга ЭКЭП методом эталонного делителя (МЭД) напряжения (рис. 1) путем интеграции в его структуру соответствующей схемы контроля

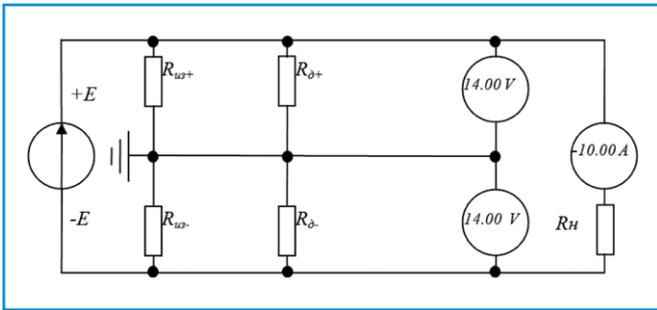


Рис. 1. Модель системы МЭД одного луча радиальной ЭКЭП при симметрии сопротивлений R_{uz+} и R_{uz-} :
 E – напряжение источника 28 В, R_{oz} – сопротивления делителя напряжения ($R_{oz+} = R_{oz-} = 10$ кОм), R_{uz} – сопротивление изоляции между корпусом и шинами питания $R_{uz-} = R_{uz+} = 1$ МОм, R_n – сопротивление нагрузки с номинальным током 10 А

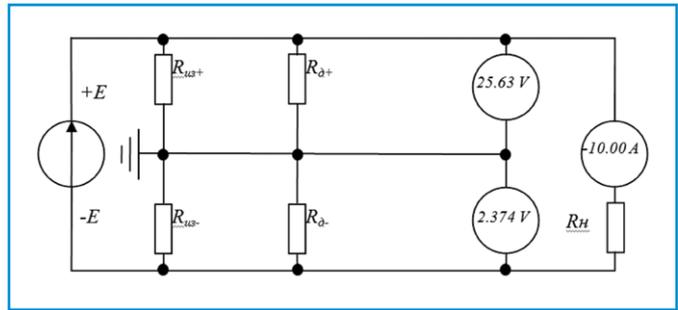


Рис. 2. Модель системы МЭД одного луча радиальной ЭКЭП при асимметрии сопротивлений R_{uz+} и R_{uz-} :
 E – напряжение источника 28 В, R_{oz} – сопротивления делителя напряжения ($R_{oz+} = R_{oz-} = 10$ кОм), R_{uz} – сопротивление изоляции между корпусом и шинами питания $R_{uz-} = 1$ кОм, $R_{uz+} = 1$ МОм, R_n – сопротивление нагрузки с номинальным током 10 А

работоспособности АТО в программной среде Electronic Workbench [3]. Помимо этого, имитационное моделирование проводилось при различных значениях R_{oz} (10 и 50 кОм), чтобы определить оптимальное значение сопротивления делителя, при котором погрешность измерений будет минимальной.

При этом по заниженному показанию одного из вольтметров (V_+ или V_-) можно определить неисправную шину, а кроме того, по степени шунтирования плеч делителя R_{oz+} и R_{oz-} и ее эквивалентное сопротивление изоляции R_{uz} относительно корпуса, тем меньше оно шунтирует соответствующее плечо делителя R_{oz+} или R_{oz-} , и тем больше напряжение на этом плече приближается к $E/2$, а R_{uz} относительно корпуса приближается к принятому для штатного режима ЭКЭП $R_{uz-} = R_{uz+} = 1$ МОм. Если ЭКЭП функционирует нормально, то шунтирование обоих плеч симметрично и показания обоих вольтметров V_+ и V_- равны, при этом $R_{uz-} = R_{uz+} = 1$ МОм. Эта степень шунтирования (или асимметрия напряжений плеч) пропорциональна эквивалентному сопротивлению изоляции R_{uz} относительно корпуса и определяется отношением показаний вольтметров U_+ и U_- , что исключает зависимость результата измерений от возможных изменений напряжения питания.

Сопротивление $R_{из.экв}$ можно задать как функцию отношения некоторых фиксированных (реперных) напряжений U_+ и U_- в виде таблицы на основе данных, полученных из модельного эксперимента,

проведенного в моделирующей среде Electronic Workbench (рис. 2).

В результате моделирования получим точку зависимости $R_{из.} = f(U_+/U_-)$. Задавая различные значения $R_{из.}$ в диапазоне от 100 Ом до 1 МОм (верхняя граница диапазона $R_{из+} = R_{из-} = 1$ МОм), получаем для каждого из них отношение напряжений U_+/U_- , строим всю зависимость $R_{из.} = f(U_+/U_-)$, а затем и $R_{из+} = f(U_-/U_+)$ для принятых сопротивлений плеч делителя

($R_{oz+} = R_{oz-} = 10000$ кОм). Эти сопротивления (R_{oz+} и R_{oz-}) определяют диапазон измерения сопротивления изоляции. Очевидно, что текущие значения напряжений U_+ и U_- , измеренные вольтметрами для конкретных значений $R_{из.}$ и отношения U_+/U_- не всегда будут совпадать с реперными. В этом случае как отношения U_+/U_- , так и значения $R_{из.экв}$ контроллер рассчитывает с помощью линейной или круговой интерполяции. Смоделируем

Таблица 1. Зависимость $R_{из.} = f(U_-/U_+)$ для сопротивлений делителя $R_{oz+} = R_{oz-} = 100000$ Ом с учетом $R_{вх} = 9880,952$ Ом АЦП (шунтируется R_{oz})

| № | U_+ , В | U_- , В | U_+/U_- | $R_{из.экв}$, Ом |
|----|-----------|-----------|-----------|-------------------|
| 1 | 27,72 | 0,2826 | 98,089 | 100 |
| 2 | 26,69 | 1,308 | 20,405 | 500 |
| 3 | 25,61 | 2,393 | 10,702 | 1000 |
| 4 | 24,69 | 3,309 | 7,4615 | 1500 |
| 5 | 22,64 | 5,37 | 4,216 | 3000 |
| 6 | 20,88 | 7,121 | 2,9322 | 5000 |
| 7 | 18,54 | 9,456 | 1,96066 | 10 000 |
| 8 | 15,90 | 12,10 | 1,314 | 30 000 |
| 9 | 15,18 | 12,82 | 1,1841 | 50 000 |
| 10 | 14,59 | 13,41 | 1,088 | 100 000 |
| 11 | 14,07 | 13,93 | 1,01 | 500 000 |
| 12 | 14,00 | 14,00 | 1,00 | 1 000 000 |

Таблица 2. Зависимость $R_{из.} = f(U_+/U_-)$ для сопротивлений делителя $R_{oz+} = R_{oz-} = 640000$ Ом (шунтируется R_{oz})

| № | U_+ , В | U_- , В | U_+/U_- | $R_{из.}$, Ом |
|----|-----------|-----------|-----------|----------------|
| 1 | 27,94 | 0,064 | 436,56 | 100 |
| 2 | 27,68 | 0,3149 | 87,90 | 500 |
| 3 | 27,38 | 0,6163 | 44,426 | 1000 |
| 4 | 26,42 | 1,577 | 16,753 | 3000 |
| 5 | 25,37 | 2,629 | 9,650 | 5000 |
| 6 | 23,56 | 4,441 | 5,3051 | 10 000 |
| 7 | 21,52 | 6,478 | 3,332 | 20 000 |
| 8 | 18,09 | 9,908 | 1,8258 | 50 000 |
| 9 | 16,29 | 11,71 | 1,39 | 100 000 |
| 10 | 14,73 | 13,27 | 1,11 | 300 000 |
| 11 | 14,30 | 13,70 | 1,044 | 500 000 |
| 12 | 14,00 | 14,00 | 1,00 | 1 000 000 |

Таблица 3. Результаты оценки погрешности в методе эталонного делителя

| № | $R_{из.э.кв+}$, кОм | $R_{из.э.кв-}$, кОм | Δ % |
|---|----------------------|----------------------|------------|
| 1 | 1 | 2 | 2,22 |
| 2 | 10 | 20 | 2,23 |
| 3 | 50 | 100 | 2,3 |
| 4 | 100 | 200 | 2,33 |
| 5 | 500 | 1000 | 2,73 |
| 6 | 1000 | 2000 | 3,2 |
| 7 | 5000 | 10 000 | 6,7 |
| 8 | 10 000 | 20 000 | 10 |

и построим зависимость $R_{из.э.кв-} = f(U_+/U_-)$ для параметров измерительной схемы (таблицы 1, 2).

В результате имитационного моделирования установлена необходимость применения в качестве делителя величины $R_0 = 640$ кОм.

Результаты оценки погрешности в методе эталонного делителя представлены в таблице 3, где измерения $R_{из}$ происходят при значениях сопротивлений $R_{из+}$ и $R_{из-}$, а также при их фиксированном отношении $R_{из+}/R_{из-} = 0,5$.

В приведенном примере $R_{вх}$ – входное сопротивление вольтметра

V_1 – принято равным 20 МОм. На основании моделирования разработана функциональная схема прибора для мониторинга работоспособности ЭКЭП АТО по критерию сопротивления изоляции.

Достоинствами данной модели являются простота конструкций и быстрота измерений, а также возможность применения при различных значениях источника. Существенными недостатками являются большая погрешность измерений и продолжительность цикла измерения сопротивлений изоляции.

Нами предлагается модифицированный метод мониторинга работоспособности ЭКЭП с эталонным делителем в диагонали. Проведено имитационное моделирование (рис. 3) системы мониторинга работоспособности ЭКЭП АТО при симметрии и асимметрии значений сопротивления изоляции.

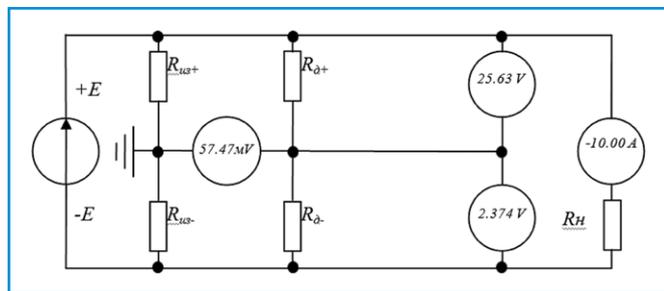


Рис. 3. Модель системы мониторинга работоспособности АТО одного луча радиальной ЭКЭП при симметрии $R_{из+}$ и $R_{из-}$: E – напряжение источника 28 В, R_0 – сопротивления делителя напряжения ($R_{0+} = R_{0-} = 1$ кОм), $R_{из}$ – сопротивление изоляции между корпусом и шинами питания $R_{из-} = R_{из+} = 10$ МОм, R_H – сопротивление нагрузки с номинальным током 10 А

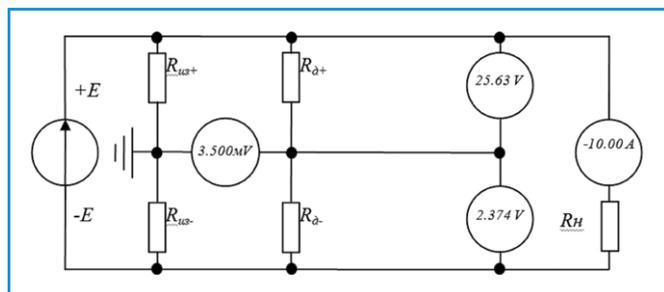


Рис. 4. Модель системы мониторинга работоспособности АТО одного луча радиальной ЭКЭП при асимметрии $R_{из+}$ и $R_{из-}$: E – напряжение источника 28 В, R_0 – сопротивления делителя напряжения ($R_{0+} = R_{0-} = 1$ кОм), $R_{из}$ – сопротивление изоляции между корпусом и шинами питания $R_{из-} = 20$ Мом, $R_{из+} = 10$ МОм, R_H – сопротивление нагрузки с номинальным током 10 А

Принцип действия данной модели заключается в том, что низкоомные сопротивления эталонного делителя $R_{0+} = R_{0-}$ создают искусственный ноль между шинами питания U_- и U_+ , который сохраняется независимо от режима схемы, то есть от величины сопротивлений изоляции $R_{из+}$ и $R_{из-}$ между шинами питания и корпусом. Поэтому при равенстве $R_{из+}$ и $R_{из-}$ вольтметр $V1$ покажет ноль (рис. 3) (на модели – десятки микровольт), а вольтметры $V2$ и $V3$ – напряжения на сопротивлениях эталонного делителя. При асимметрии $R_{из.э.кв+}$ и $R_{из.э.кв-}$ потенциал корпуса смещается относительно искусственного нуля, так как определяется величинами сопротивлений изоляции $R_{из+}$ и $R_{из-}$, так, как это показано на модели (рис. 4).

Очевидно, что вольтметр $V1$ покажет полуразность между напряжениями на сопротивлениях изоляции $R_{из+}$ и $R_{из-}$. Далее контроллер по знаку показаний вольтметра $V1$ определяет неисправную шину, а по величине показаний – ее сопротивление относительно корпуса с помощью полученной из модели градуировочной таблицы $R_{из} = f(2U_{V1})$.

На основе имитационного моделирования составлена схема замещения (рис. 5).

В представленной схеме сопротивления R (2 шт.), $R_{из1}$, $R_{из2}$ образуют мост, к одной из диагоналей питания подключен источник напряжения E , в другую диагональ включен коммутируемый резистор R_0 , для которого могут быть заданы два различных значения сопротивления. На этом этапе значения сопротивлений шин, внутреннего сопротивления источника питания приняты пренебрежимо малыми, потому ветвь,

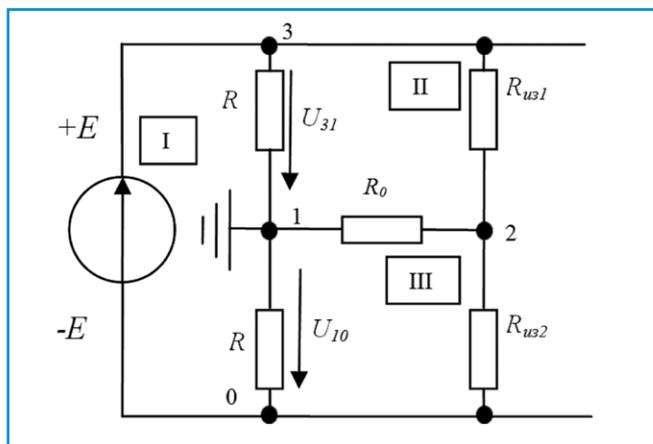


Рис. 5. Упрощенная идеализированная схема замещения: R – сопротивление низкоомного делителя, R_0 – сопротивление делителя в диагонали, E – напряжение источника, $R_{из1}$, $R_{из2}$ – сопротивления изоляции

содержащую нагрузку, можно не рассматривать.

Уравнения по методу контурных токов для рассматриваемой упрощенной схемы метода эталонного делителя в диагонали имеют следующий вид:

$$R_{11} \cdot I_{11} - R_{12} \cdot I_{22} - R_{13} \cdot I_{33} = E, \quad (1)$$

$$-R_{21} \cdot I_{11} + R_{22} \cdot I_{22} - R_{23} \cdot I_{33} = 0, \quad (2)$$

$$-R_{31} \cdot I_{11} - R_{32} \cdot I_{22} + R_{33} \cdot I_{33} = 0, \quad (3)$$

где $R_{11} = 2R, R_{22} = R + R_0 + R_{us1}, R_{33} = R + R_0 + R_{us2}, R_{12} = R_{21} = R, R_{13} = R_{31} = R, R_{23} = R_{32} = R_0$.

Можно записать систему уравнений типа (1–3) для двух значений сопротивлений резисторов R_{01}, R_{02} . Система уравнений содержит переменные, значения которых R_{us1}, R_{us2} подлежат определению с использованием результатов измерений на объекте.

Примем, что для каждого из режимов подлежат измерению напряжения U_{10}, U_{21}, U_{31} . Тогда для контуров II, III можно записать уравнения

$$R_{us1} \cdot I_{22} + U_{21} - U_{31} = 0, \quad (4)$$

$$R_{us2} \cdot I_{33} - U_{10} - U_{21} = 0, \quad (5)$$

а выражения для значений сопротивлений изоляции примут следующий вид:

$$R_{us1} = \frac{d_1 \cdot s_2 \cdot R_{01} - k \cdot d_2 \cdot s_1 \cdot R_{02}}{s_2 U'_{21} - k \cdot s_1 \cdot U''_{21}}, \quad (6)$$

$$R_{us2} = \frac{d_2 \cdot s_1 \cdot R_{01} - k \cdot d_1 \cdot s_2 \cdot R_{02}}{k \cdot d_1 \cdot U''_{21} - d_2 \cdot U'_{21}}, \quad (7)$$

где $d_1 = U'_{31} - U'_{21}, d_2 = U''_{31} - U''_{21}, s_1 = U'_{10} + U'_{21}, s_2 = U''_{10} + U''_{21}, p = R_{01}/R_{02}$.

Знаками (' и ''), индексами 1, 2 обозначены переменные и их комплексы для режимов с резисторами $R_0 = R_{01}, R_0 = R_{02}$.

Расчетное моделирование в MS Excel при различных сочетаниях значений параметров схемы подтвердило правильность расчетных соотношений. Значительным разбросом значений сопротивлений резисторов и изоляции шин питания обусловлено существенное различие значений элементов матриц уравнений контурных токов, обратных матриц.

К достоинствам рассматриваемого метода относятся простота конструкции и точность измерения сопротивления изоляции. Однако присутствуют и недостатки:

- высокие требования к входному сопротивлению вольтметра V_1 (20 МОм и более), так как чем ниже входное сопротивление вольтметра V_1 , тем больше погрешность измерения за счет электрической связи между искусственным

Таблица 4. Анализ методов мониторинга работоспособности ЭКЭП АТО по критерию сопротивления изоляции

| Наименование параметра | МЭД, $R_0 = 100 \text{ кОм}$ | МЭД, $R_0 = 640 \text{ кОм}$ | ММСКРД |
|--|---------------------------------|---------------------------------|--------|
| Оценка погрешности измерений | - | + | - |
| Продолжительность цикла измерения сопротивления изоляции | - | - | - |
| Наличие перечня критических требований к аппаратуре и комплектующим элементам для реализации | + | + | - |
| Возможность работы в эксплуатационном режиме с подключенным АФ | + | + | + |
| Возможность работы в эксплуатационном режиме с отключенным АФ | + | + | + |
| Возможность работы в отладочном режиме | + | + | + |

Примечание. МЭД – метод эталонного делителя, ММСКРД – метод мостовой схемы с коммутируемым делителем в диагонали, АФ – антистатический фильтр.

нулем и корпусом, и тем больше эффект шунтирования R_{us} сопротивлениями образцового делителя R_0 ;

- неравномерность распределения погрешности по диапазону измерения R_{us} (чем выше сопротивление изоляции, тем больше погрешность измерения).

На основе имитационного моделирования и результатов проведенных расчетов представим анализ предложенных методов по различным критериям (таблица 4).

Сводная таблица, демонстрирующая достоинства и недостатки методов, выявленные в ходе имитационного моделирования ЭКЭП, показывает, что наиболее эффективное научно-техническое решение задачи разработки и реализации электротехнической системы мониторинга работоспособности АТО находится в области применения группы динамических методов, включающих МЭД. Однако для повышения эффективности мониторинга требуется решение задачи по обеспечению быстрого действия процесса мониторинга, а также комплексного учета оценки, отражающей критическое состояние АТО.

Таким образом, можно сделать вывод о необходимости интеграции известных методов и подходов в рамках научно-технической концепции метода мониторинга сложного электротехнического комплекса, в том числе комплекса электропитания АТО.

Литература

1. Горбачевский Н. И. Аналитический комплекс прогнозирования надежности электромобилей и автомобилей с комбинированной силовой установкой / Н. И. Горбачевский, А. Г. Сорокин, В. Б. Кислинский, Л. Х. Мифтахова // Вестник Казанского технологического университета, 2014. Т. 17, № 3. – С. 227–229.
2. Козловский В. Н. Комплекс электронных систем управления движением легкового ав-

томобилia с комбинированной силовой установкой. Часть 1 / В. Н. Козловский, В. И. Строганов, В. В. Дебелов, М. А. Пьянов // Электротехнические и информационные комплексы и системы, 2014. Т. 10, № 1. – С. 40–49.

3. Панфилов Д. И., Чепурин И. Н., Миронов В. Н., Обухов С. Г., Шитов В. А., Иванов В. С. Электротехника и электроника в экспериментах и упражнениях. Практикум на Electronics Workbench. В 2 томах. Т. 2. Электроника / Под общ. ред. Д. И. Панфилова. Изд. 2-е, перераб и доп. – М.: МЭИ, 2004. – 325 с. ISBN: 5-7046-0954-6.

Козловский Владимир Николаевич

Инженер по специальности «Электрооборудование автомобилей и тракторов». В 1999 году окончил Тольяттинский политехнический институт. Доктор технических наук. В 2010 году защитил докторскую диссертацию на тему «Обеспечение качества и надежности системы электрооборудования автомобилей». Автор более 150 научных работ, в том числе 10 монографий. В настоящее время работает заведующим кафедрой «Теоретическая и общая электротехника» Самарского государственного технического университета (СамГТУ).

Новикова Анна Петровна

Родилась в 1983 году. В 2005 году окончила СамГТУ по специальности «Инженер-электрик». Опыт работы – 11 лет. В настоящее время работает ассистентом кафедры «ТОЭ» и учится в аспирантуре СамГТУ. Имеет 7 научных работ.

Kozlovskiy Vladimir

Is an engineer, specialization is «Car and tractor electric equipment». In 1999 he graduated from Tolyatty Polytechnic Institute. Doctor of Engineering. In 2010 he defended a Dphil in the subject «Quality and safety assurance of car electric equipment system». He is an author of more than 150 scientific works, including 10 monographs. At present he works as department chairman «Theoretic and general electrotechnics» at the Samara State Technical University (SamGTU).

Novikova Anna

She was born in 1983. In 2005 she graduated from Samara State Technical University majoring in «Electrical engineer». She has 11 years of work experience. At present, she works as an assistant of the «Theoretical and General Electrical Engineering» department and studies in graduate school SamGTU. She has 7 scientific papers.

Робастное проектирование и многофакторные испытания электротехнических изделий транспорта для обеспечения их качества

// Robust design and multivariate testing of electrotechnical products transport to ensure their quality //

Лисенков А. Н., д.т. н., профессор, МГУПС (МИИТ), Москва

*В статье представлена характеристика современных подходов к проектированию и испытанию электротехнических изделий с целью обеспечения их качества с использованием разработанных методов и планов многофакторного эксперимента для изучения основных и учета дестабилизирующих факторов, условий эксплуатации, в том числе порядка воздействий факторов. Рассмотрены возможности подходов в типовых задачах проектирования и испытаний электротехнических изделий для железнодорожного транспорта. **Ключевые слова:** робастное проектирование, испытания электротехнических изделий транспорта, планы многофакторного эксперимента, опыт использования.*

Проектирование и испытания являются важнейшими этапами жизненного цикла изделий в производстве любой продукции, определяющими ее итоговое качество. Особенности современной практики проектирования и испытаний состоят в необходимости изучения влияния на показатели качества большого числа основных факторов (режимных и конструктивных параметров изделий с учетом условий их эксплуатации). На производственных фирмах ведущих промышленных стран созданы соответствующие центры испытаний продукции с необходимым оборудованием, позволяющим исследовать различные варианты влияния агрессивных воздействий и дестабилизирующих факторов среды функционирования в процессе эксплуатации изделий (температуры, влажности, механической нагрузки, электромагнитного излучения и т.п.). В Японии, например, поставщиком такого испытательного оборудования для изделий электронной техники является фирма «Табай – Еспек». По данным этой

The characteristic of modern approaches to designing and testing electrical products to ensure their quality, using the developed methods and plans of multifactorial experiment to study how the major and accounting destabilizing factors, conditions of use, including order effects of factors. Considered possible approaches to model the task of designing and testing electrical products for rail transportation.

Keywords: robust design, testing of electrotechnical products transport, plans of multifactorial experiment, the experience of using.

фирмы, оснащение заводов подобным оборудованием позволяет значительно снизить количество дефектов и потерь в процессе эксплуатации изделий [1].

Эффективным средством решения задач проектирования и испытаний изделий является использование современных методов планирования многофакторных экспериментов (МФЭ). Эти методы позволяют значительно сократить число исследуемых вариантов проектирования и испытаний, получить количественные модели зависимости показателей качества от основных факторов (режимных и конструктивных параметров изделий), учесть влияние условий эксплуатации изделий как на этапе проектирования, так и на этапе испытаний продукции [1, 3].

В настоящей работе представлена характеристика современных подходов к обеспечению качества изделий – методология их робастного проектирования и испытаний с использованием методов МФЭ. При решении таких задач предложено использовать разработанные

экономные ортогональные и квазиортогональные планы для изучения влияния основных и учета дестабилизирующих факторов, характеризующих условия эксплуатации, в том числе порядка воздействий факторов при испытаниях. Приведены примеры постановки типовых задач робастного проектирования и многофакторных испытаний электротехнических изделий для железнодорожного транспорта.

Робастное проектирование (РП) предназначено для получения изделий, рабочие характеристики и показатели качества которых устойчивы (робастны) к действию дестабилизирующих факторов, возникающих после проектирования на этапах производства, хранения и эксплуатации продукции. Оно основано на использовании экономных планов МФЭ неполного перебора вариантов [2, 3]. При таком РП с помощью экономных планов МФЭ исследуется влияние основных и действие имитируемых дестабилизирующих факторов. Итоговая схема – план РП – представляет собой прямое произведение плана основных факторов и плана дестабилизирующих факторов, то есть каждый из N вариантов (комбинаций уровней) основных факторов испытывается во всех n вариантах, задаваемых планом дестабилизирующих факторов. По результатам таких расчетов кроме значений выходного показателя качества определяют значения T -критерия Тагути (отношения «Сигнал/шум»), характеризующего значения показателя качества u с учетом его изменчивости [2, 3]. Далее анализируется зависимость T -критерия от каждого из основных факторов, и фиксируется та комбинация значений факторов, которая соответствует наибольшему значению T -критерия. Полученный таким образом вариант с наибольшими значениями T -критерия соответствует наилучшему значению показателя качества и его минимальной изменчивости. Он

минимизирует функцию потерь качества – нового экономического показателя, характеризующего истинное качество продукции, проявляющееся в процессе ее эксплуатации, и оценивающего издержки производителя L_d на ремонт отказавших при эксплуатации в период гарантийного срока изделий или их замену новыми [2–4]. Для оценки таких потерь $L = ks^2_y$, где $k = L_d / (D/2)^2$, на производстве любой продукции есть все необходимые данные: указанные издержки производителя L_d , допуск на значения контролируемого показателя качества D и величина его изменчивости s^2_y , определяемая по выборке изделий [3].

В зависимости от требований к показателю качества (ПК) у применяют следующие основные четыре типа T -критериев Тагути:

$$T_1 = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right)$$

– используется в задачах, где необходимо обеспечить наименьшее возможное значение ПК согласно принципу «Лучшее меньше» (например, минимизация суммарной стоимости изделия, расхода топлива двигателем, мощности, потребляемой электроприбором и т.п.);

$$T_2 = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i} \right)$$

– используется в задачах, где требуется обеспечить наибольшее возможное значение ПК, согласно принципу «Лучшее больше» (например, наибольшая прочность получаемого материала, время наработки изделия на отказ и т.п.);

$$T_3 = 10 \log \left(\frac{\bar{y}^2}{s^2} \right)$$

– используется в задачах, когда наилучшим является значение ПК, равное его желаемому номинальному по принципу «Лучшее выбранное». Например, обеспечение желаемого линейного размера изготавливаемых деталей типа диаметра поршней двигателя внутреннего сгорания. В случае превышения этого параметра двигатель при работе может заклинить, а при занижении двигатель теряет мощность. Другой пример применения критерия – обеспечение желаемого номинала значения тока проектируемой электрической цепи с его минимальной изменчивостью.

Если показатель качества измеряется по двоичной шкале, то есть представляет долю (процент) годных изделий (p), используется критерий

$$T = 10 \log \left(\frac{p}{1-p} \right).$$

Отметим, что в процедуре РП для изучения влияния основных и дестабилизирующих факторов используют экономные ортогональные планы неполного перебора вариантов. Это так называемые планы главных эффектов факторов, которые позволяют строить факторные модели зависимости $y = f(x_1, \dots, x_k)$, включающие только коэффициенты влияния самих исследуемых факторов (линейные, квадратичные, кубические и т.д. эффекты) без эффектов их взаимного влияния. За счет этого и обеспечивается экономия опытов по сравнению с планами полного перебора комбинаций уровней факторов, то есть планами полного факторного эксперимента (ПФЭ) [3].

В качестве иллюстрации методика РП рассмотрим задачу обеспечения качества – стабильности значений тока необходимого номинала y в проектируемом электронном контуре, содержащем активное сопротивление R и индуктивность L . В реальных условиях его эксплуатации из-за возможного наличия дестабилизирующих факторов (колебаний напряжения V , частоты тока f , а также температуры и влажности воздуха, влияющих на R и L) значения тока $I = \frac{V}{\sqrt{R^2 + (2\pi fL)^2}}$ будут меняться.

Методика РП при наличии подобной аналитической зависимости предполагает приведение многовариантных расчетов значений тока при различных значениях основных факторов R и L . Например, на трех разных уровнях, каждый в интересующем диапазоне по плану

$3^2/9$ из $N = 9$ вариантов, имитировать влияние упомянутых четырех дестабилизирующих факторов, каждый на двух уровнях в интересующем диапазоне по плану $2^4/16$ из $n = 16$ вариантов. Итоговый план робастного проектирования, в котором каждый вариант основного плана испытывается в каждом варианте плана дестабилизирующих факторов, будет содержать всего $N \times n = 144$ варианта. Для каждого из полученных N вариантов вычисляют среднее значение тока \bar{y}_u , его дисперсию s_u^2 и значение T -критерия (в данном случае T_3). Далее анализируют графическую зависимость T -критерия от уровней каждого из основных факторов, фиксируя те их уровни, при которых наблюдается наибольшее значение критерия. Комбинация таких уровней и будет определять наилучший робастный вариант (значения R и L), который обеспечит наибольшую стабильность найденного значения тока независимо от действия упомянутых дестабилизирующих факторов в определенном их диапазоне.

В задачах РП, где с помощью МФЭ приходится не проводить многовариантные расчеты по имеющейся модели, а создавать и испытывать прототипы проектируемых систем, из-за ограниченности ресурсов используют экономные планы неполного перебора вариантов – дробные реплики полного факторного эксперимента (ПФЭ) [2, 3]. Например, в рассматриваемой в [3] задаче проектирования теплообменника с целью минимизировать его стоимость вместо плана $3^3/27$ для трех основных факторов на трех уровнях каждый

Таблица 1. Многофакторный план $3^3-1 \otimes 2^3-1$ из $N = 36$ вариантов и результаты расчетов в задаче проектирования теплообменника

| | | | | |
|-------|---|---|---|---|
| z_1 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| z_2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| z_3 | 1 | 2 | 2 | 1 |

| № п/п | x_1 | x_2 | x_3 | y_{iu} | | | | \bar{y}_u | s_u^2 | T_1 |
|-------|-------|-------|-------|----------|------|------|------|-------------|---------|--------|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 4691 | 3998 | 4961 | 4208 | 4465 | 441 | -73,03 |
| 2 | 1 | 2 | 2 | 5489 | 4789 | 5728 | 5036 | 5274 | 445 | -74,47 |
| 3 | 1 | 3 | 3 | 6325 | 5621 | 6641 | 5899 | 6122 | 451 | -75,76 |
| 4 | 2 | 1 | 3 | 4926 | 4226 | 5247 | 4509 | 4725 | 452 | -74,52 |
| 5 | 2 | 2 | 1 | 5568 | 4988 | 5851 | 5086 | 5348 | 440 | -74,59 |
| 6 | 2 | 3 | 2 | 6291 | 5598 | 6590 | 5838 | 6079 | 446 | -74,70 |
| 7 | 3 | 1 | 2 | 4993 | 4312 | 5304 | 4539 | 4787 | 447 | -73,63 |
| 8 | 3 | 2 | 3 | 5723 | 5031 | 6051 | 5298 | 5526 | 452 | -74,87 |
| 9 | 3 | 3 | 1 | 6077 | 6029 | 6991 | 6194 | 6473 | 442 | -76,24 |

и плана $2^{3//8}$ для трех дестабилизирующих факторов, характеризующих условия эксплуатации на двух уровнях каждый, то есть всего $N = 27 \times 8 = 216$ вариантов, использованы план неполного перебора вариантов $3^{3-1//9}$ и план $2^{3-1//4}$, составляющие план РП, содержащий только $N = 9 \times 4 = 36$ вариантов (таблица 1).

В результате с использованием критерия T_1 выявлен робастный к действию факторов эксплуатации вариант конструкции теплообменника (значения факторов x), обеспечивающий снижение его стоимости на 15% по сравнению с исходным вариантом, с меньшей изменчивостью s_y .

Формализованность и простота реализации методики РП с использованием T -критериев Тагути делают ее доступной для широкого круга пользователей. Возможности, ограничения и альтернативы использования критериев в РП рассмотрены в [2, 3].

Одна из особенностей задач проектирования и испытаний изделий при наличии дестабилизирующих факторов состоит в необходимости кроме оценки

влияния основных факторов на значения показателей качества и рабочие характеристики учитывать еще и порядок воздействий факторов. Известно два типа планов для проведения многофакторных испытаний с учетом порядка воздействий факторов [5]. В планах первого типа 2^p для p факторов, испытываемых в $p!$ порядках (или их части при использовании дробных планов), результирующие значения показателя качества измеряют после каждого воздействия в каждой определенной последовательности (см. пример плана для $p = 3$ факторов A, B, C в таблице 2). В планах второго типа используют обычные матрицы МФЭ, например, 2^k , в которых столбцы взаимодействий факторов высшего порядка используют для представления порядка воздействий факторов. При этом значения показателя качества y измеряют после воздействия всех факторов, часть из которых является порядковозависимыми. В таблице 3 представлены план эксперимента $2^{3//8}$ и его результаты по изучению действия трех факторов (температуры A , влажности B и солнечной радиации C) на

показатель качества у изделий специального назначения.

В этой задаче первые два фактора предполагались порядковозависимыми, влияние порядка представлено последним столбцом таблицы 2. По результатам эксперимента получена модель зависимости показателя качества y от исследуемых факторов с учетом их взаимного влияния и порядка их воздействий b_{ij} при испытаниях:

$$y = b_0 + \sum_i b_i x_i + \sum_{i,j} b_{ij} x_i x_j + b_{ii} x_{ii}$$

На ее основе выявлены значения факторов x_1, x_2 и порядок их воздействия ВА, характеризующие наиболее жесткий режим для сертификационных испытаний, при которых и следует фиксировать значение показателя качества y .

Примеры робастного проектирования и многофакторных испытаний изделий специального назначения с учетом порядка воздействий факторов, с использованием соответствующих планов и приведенных там первоисточников даны в [1, 5]. Разработанные для таких задач каталоги экономных ортогональных и квазиортогональных планов, включая планы для изучения факторов с учетом порядка их воздействий, представлены в [5].

Отметим, что возможности проведения испытаний с учетом порядка воздействий факторов с помощью подобных планов в работах Тагути и его последователей по робастному проектированию, насколько нам известно, не рассматривались.

Проведение испытаний с учетом порядка воздействий факторов позволяет разработать обоснованные рекомендации по созданию новых стандартов сертификационных испытаний в выявленных наиболее жестких режимах указанных воздействий, при которых и следует фиксировать «паспортные» данные о рабочих характеристиках, надежности и значениях других показателей качества. Проводимые на первом этапе жизненного цикла изделий РП испытания в лабораторных условиях с использованием дешевого оборудования, сырья и комплектующих являются наиболее эффективным с экономической точки зрения решением проблемы обеспечения качества продукции и способом выявить наиболее жесткие условия для проведения ее сертификационных испытаний.

Примером РП электротехнических изделий на основе теоретической

Таблица 2. План типа 2^p для $p = 3$

| Порядок воздействия | Воздействия отсутствуют | Исходное значение отклика $y_{j=0}$ | Измерение | | |
|---------------------|-------------------------|-------------------------------------|------------|------------|------------|
| | | | $j = 1$ | $j = 2$ | $j = 3$ |
| ABC | - | y_{101} | $y_{111}A$ | $y_{121}B$ | $y_{131}C$ |
| ACB | - | y_{102} | $y_{112}A$ | $y_{122}C$ | $y_{132}B$ |
| BAC | - | y_{103} | $y_{113}B$ | $y_{123}A$ | $y_{133}C$ |
| BCA | - | y_{104} | $y_{114}B$ | $y_{124}C$ | $y_{134}A$ |
| CAB | - | y_{105} | $y_{115}C$ | $y_{125}A$ | $y_{135}B$ |
| CBA | - | y_{106} | $y_{116}C$ | $y_{126}B$ | $y_{136}A$ |

Таблица 3. План эксперимента $2^{3//8}$ для изучения действия трех факторов

| Опыты | Факторы | | | | |
|-------|--|-------------|------------|---|-------|
| | A температура | B влажность | C радиация | Порядок воздействия X_{ii} $AB(-1), A(+1)$ | y |
| | Кодовые значения верхней (+1) и нижней (-1) дозы воздействий | | | | |
| | x_1 | x_2 | x_3 | $x_{ii} = x_1 x_2 x_3$ | - |
| 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | y_1 |
| 2 | +1 | -1 | -1 | +1 | . |
| 3 | -1 | +1 | -1 | +1 | . |
| 4 | +1 | +1 | -1 | -1 | . |
| 5 | -1 | -1 | +1 | +1 | . |
| 6 | +1 | -1 | +1 | -1 | . |
| 7 | -1 | +1 | +1 | -1 | . |
| 8 | +1 | +1 | +1 | +1 | y_8 |

модели может служить проектирование силового многофункционального вольтодобавочного трансформатора для повышения эффективности работы системы тягового электроснабжения переменного тока на железнодорожном транспорте [6, 7]. В подобной задаче одним из показателей качества у является величина потерь электроэнергии в тяговой сети и системе внешнего электроснабжения. Основные управляемые факторы – емкость компенсирующей установки X_1 , величина вольтодобавки к напряжению контактной сети X_2 , фаза вольтодобавки X_3 , К дестабилизирующим факторам относятся электрические характеристики тяговой сети: Z_1 – значение сопротивления R , Z_2 – значение индуктивности L , Z_3 – значение емкости C , Z_4 – значение сопротивления «Рельс – земля» R_{pz} , Z_5 – значение скорости движения электровоза. Используя план 3^3 (или его реплику) из N вариантов (комбинаций уровней трех факторов X) и план 3^5 (или его реплику) для пяти факторов Z из n вариантов в полученных $N \times n$ вариантах по представленной в [6, 7] модели, можно рассчитать значения y , а также критерия T_1 . По результатам графического анализа зависимости T_1 от каждого из факторов X определяют наилучший робастный вариант – значения основных факторов X , обеспечивающие наименьшие потери y независимо от действия указанных дестабилизирующих факторов в определенном их диапазоне.

Рассмотренные подходы к проектированию и испытанию изделий

с использованием методов МФЭ позволяют получать наиболее полную информацию о зависимости показателей качества от определяющих их факторов с учетом условий эксплуатации изделий, выявлять наилучшие варианты проектируемых систем, разрабатывать обоснованные рекомендации по проведению сертификационных испытаний продукции, результаты которых будут демонстрировать ее истинное качество в процессе эксплуатации.

Литература

1. Лисенков А. Н. Многофакторные испытания технических систем и материалов // Надежность и сертификация оборудования для нефти и газа, 2002, № 4. – С. 47–53.
2. Леон Р. и др. Управление качеством, робастное проектирование, метод Тагути. Пер. с англ. – М.: Сейфи, 2002.
3. Лисенков А. Н. Робастное проектирование: использование ортогональных планов неполного перебора вариантов // Методы менеджмента качества, 2007, № 5. – С. 18–22.
4. Лисенков А. Н. Инжиниринговый подход к обеспечению качества // Методы менеджмента качества, 2016, № 10. – С. 26–32.
5. Маркова Е. В., Лисенков А. Н. Комбинаторные планы в задачах многофакторного эксперимента. – М.: Наука, 1979.
6. Косарев Б. И., Сербиненко Д. В., Алексеенко М. В. Система тягового электроснабжения переменного тока с многофункциональными вольтодобавочными трансформаторами // Транспорт: наука, техника, управление, 2013, № 1. – С. 13–18.
7. Косарев А. Б., Сербиненко Д. В., Алексеенко М. В. Оценка эффективности внедрения

многофункционального вольтодобавочного трансформатора для повышения напряжения в тяговой сети // Электроника и электрооборудование транспорта, 2013, № 4. – С. 2–6.

Лисенков Александр Николаевич

Родился в 1940 году. В 1963 году окончил Московский энергетический институт по специальности «Инженер-электрик по автоматике и телемеханике». Доктор технических наук, профессор. В 2000 году защитил диссертацию по теме «Статистическая оптимизация и моделирование в задачах биотехнологии и медицины (вопросы теории и приложений методов многофакторного эксперимента)». Опыт работы – 50 лет. В настоящее время работает профессором кафедры «Менеджмент и управление персоналом организации» МГУПС (МИИТ). Имеет более 250 публикаций, в том числе 3 монографии.

Lisenkov Alexander

Was born in 1940. In 1963 he graduated from Moscow Power Engineering University majoring in «Electrical engineer for automation and telemechanics». He is Candidate of Technical Sciences, professor. In 2000 he defended the thesis, the subject of dissertation is «Statistical optimization and modeling in the problems of biotechnology and medicine (questions of theory and applications of methods of multi-factor experiment)». He has 50 years of work experience. At present he works as professor of «Personnel management and management of the organization» department of Moscow State University of Railway Engineering. He has more than 250 publications, including 3 monographs.

О правовых актах, регламентирующих контроль и надзор в сфере правовой охраны и использования результатов интеллектуальной деятельности гражданского, военного, специального и двойного назначения

Роспатентом приказом от 17.10.2016 № 164 утвержден «Перечень правовых актов, содержащих обязательные требования, соблюдение которых оценивается при проведении мероприятий по контролю и надзору в сфере правовой охраны и использования результатов интеллектуальной деятельности гражданского, военного, специального и двойного назначения, созданных за счет бюджетных ассигнований федерального бюджета, а также контролю и надзору в установленной сфере деятельности в отношении государственных заказчиков

и организаций-исполнителей государственных контрактов, предусматривающих проведение научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ».

Перечень состоит из следующих разделов:

- «Федеральные законы»;
- «Указы Президента Российской Федерации, постановления и распоряжения Правительства Российской Федерации»;
- «Нормативные правовые акты федеральных органов исполнительной власти и нормативные документы

федеральных органов исполнительной власти»;

– «Иные нормативные документы, обязательность соблюдения которых установлена законодательством Российской Федерации».

С перечнем актов можно ознакомиться на сайте Роспатента http://www.rupto.ru/activities/rid/norm_akt_sobl_kontrol.

Краснов Л.А.
Редакция журнала
«Электроника и электро-
оборудование транспорта»

О предоставлении субсидий российским производителям на финансирование части затрат, связанных с регистрацией на внешних рынках объектов интеллектуальной собственности

Постановлением Правительства РФ от 15.12.2016 № 1368 утверждены Правила предоставления субсидий российским производителям на финансирование части затрат, связанных с регистрацией на внешних рынках объектов интеллектуальной собственности.

Правила устанавливают цели, условия и порядок предоставления субсидий российским производителям – юридическим лицам, зарегистрированным на территории Российской Федерации и производящим товары, услуги, работы и технологии, в состав которых входят объекты интеллектуальной собственности, на финансирование части затрат, связанных с регистрацией на внешних рынках объектов интеллектуальной собственности.

Субсидии направлены на обеспечение правовой охраны и защиты за рубежом результатов интеллектуальной деятельности организаций и повышение активности патентования конкурентоспособных результатов интеллектуальной деятельности за рубежом в целях снижения потерь организаций при поставках продукции на внешние рынки.

Субсидия предоставляется в пределах бюджетных ассигнований, предусмотренных в федеральном законе о федеральном бюджете на соответствующий финансовый год и плановый период, и лимитов бюджетных обязательств.

Субсидии предоставляются в целях компенсации части фактических затрат, понесенных организацией не ранее 1 января 2016 года:

- на подготовку, подачу международной заявки и делопроизводство по ней;

- на оплату пошлин, связанных с подачей и рассмотрением международной заявки;

- на подготовку, подачу национальной или региональной заявки и делопроизводство в отношении такой заявки;

- на оплату пошлин, предусмотренных национальными патентными ведомствами, связанных с подачей, рассмотрением заявок, выдачей патентов и поддержанием их в силе в течение первых трех лет;

- на подготовку, подачу заявки на международную регистрацию товарного знака и делопроизводство в отношении такой заявки;

- на оплату пошлин, подлежащих уплате для получения международной регистрации товарного знака.

Затраты на оплату пошлин возмещаются в объеме 100 процентов.

Расходы организации на оплату услуг по подготовке, подаче заявки и делопроизводству в отношении ее возмещаются в объеме 70 процентов фактически понесенных затрат, но не более установленных предельных значений:

- по международной заявке – 50 тысяч рублей;

- по заявке в национальное патентное ведомство или межправительственную организацию:

- Соединенные Штаты Америки – 325 тысяч рублей;

- Европейское патентное ведомство (ЕПВ) – 525 тысяч рублей;

- Япония – 260 тысяч рублей;

- Китайская Народная Республика – 200 тысяч рублей;

- Республика Корея – 200 тысяч рублей;

- другие страны – 160 тысяч рублей;

- по заявке на международную регистрацию товарного знака в соответствии с Мадридским соглашением – 50 тысяч рублей.

Субсидии предоставляются на основании соглашения, заключенного организацией с акционерным обществом «Российский экспортный центр» как агентом правительства РФ и Министерством промышленности и торговли.

В предоставлении субсидии может быть отказано в случаях:

- подтверждения факта получения организацией субсидии из бюджетов бюджетной системы Российской Федерации на возмещение одних и тех же затрат, связанных с регистрацией на внешних рынках одних и тех же объектов интеллектуальной собственности;

- непредставления (представления не в полном объеме) организацией предусмотренных документов или их несоответствия установленным требованиям;

- наличия в представленных документах недостоверной информации.

Показателем результативности предоставления субсидии являются получение патента и (или) свидетельства о регистрации товарного знака либо решение об отказе в выдаче патента и (или) решение об отказе в регистрации товарного знака, выданное национальным патентным ведомством, за исключением случаев, когда такой отказ связан:

- с нарушением организацией сроков делопроизводства по заявке, установленных нормативными правовыми актами национальных патентных ведомств;

- с неоплатой или несвоевременной оплатой организацией пошлин, связанных с рассмотрением заявки и выдачей патента, установленных законодательством иностранного государства и (или) нормативными правовыми актами национальных патентных ведомств.

В случае установления факта нарушения целей, условий и порядка предоставления субсидии соответствующие средства подлежат возврату в доход федерального бюджета.

Краснов Л.А.
Редакция журнала
«Электроника и электро-
оборудование транспорта»

Об изменении осуществления государственными заказчиками управления правами Российской Федерации на результаты интеллектуальной деятельности гражданского, военного, специального и двойного назначения

Постановлением Правительства от 2 июня 2016 года № 498 в пункт 16 «Правил осуществления государственными заказчиками управления правами Российской Федерации на результаты интеллектуальной деятельности гражданского, военного, специального и двойного назначения», утвержденным постановлением Правительства от 22 марта 2012 года № 233, внесены изменения, касающиеся вопросов правовой защиты интересов РФ при поставке иностранному заказчику продукции, а также в передаваемых технологиях ее производства (ремонта) при осуществлении военно-технического

сотрудничества. Указанные вопросы должны быть урегулированы с Роспатентом. Для этого государственные заказчики в трехмесячный срок со дня принятия решения Правительства или Федеральной службы по военно-техническому сотрудничеству о поставке продукции иностранному заказчику должны представить в Роспатент уведомление о результатах интеллектуальной деятельности, права на которые принадлежат РФ, которые выражены (содержатся) в поставляемой иностранному заказчику продукции, а также в передаваемых технологиях ее производства (ремонта), в отношении которых

обеспечена правовая охрана (принято решение об обеспечении правовой охраны), в том числе правовая охрана в странах поставки продукции. Форма уведомления, включающая в том числе сведения о государственном учете указанных результатов интеллектуальной деятельности, утверждается Роспатентом по согласованию с государственными заказчиками. Постановление вступило в силу с 1 июля 2016 года.

Краснов Л.А.
Редакция журнала
«Электроника и электро-
оборудование транспорта»

Сведения об авторах

К.т.н.

Скрипко Леонид Александрович
+7-925-599-62-59

Шапран Федор Валерьевич
+7-922-209-01-09

К.т.н., доцент

Сафин Альфред Робертович
+7-952-044-16-05

Д.т.н., профессор

Герман Леонид Абрамович
+7-908-769-94-26

Д.т.н., профессор

Болнокин Виталий Евгеньевич
+7-929-965-83-15

К.т.н.

Доманов Виктор Иванович
+7-842-241-18-63

Д.т.н., доцент

Нефедьев Алексей Иванович
+7-844-224-81-64

Д.т.н.

Козловский Владимир Николаевич
+7-917-978-83-56

Д.т.н., профессор

Лисенков Александр Николаевич
+7-916-570-80-43

ТРЕБОВАНИЯ К РЕКЛАМНЫМ И АВТОРСКИМ МАТЕРИАЛАМ

Рекламные материалы принимаются в форматах «.cdr», «.eps» или «.tif» (300 dpi). Цветовая модель – CMYK. Все шрифты должны быть переведены в кривые.

Авторские материалы. Текст статьи в формате «.doc» (Microsoft Word). Обязательно наличие аннотации, ключевых слов и списка используемой литературы. Название статьи, аннотация и ключевые слова должны быть переведены на английский язык. Все рисунки в форматах «.cdr» или «.eps», фотографии – в формате «.tif» (300 dpi). Каждый рисунок или фотография должны быть представлены отдельным файлом.

СТОИМОСТЬ ГОДОВОЙ ПОДПИСКИ:

(6 номеров) – **6 000 руб.**, в т.ч. НДС 18%

Оформить подписку можно:

– через редакцию – необходимо направить по факсу или электронной почте заявку с указанием банковских реквизитов, наименования организации (фирмы), точного почтового адреса и количества комплектов журнала.

Тел./факс: (495) 500-40-20, 557-23-95,

e-mail: npptez@mail.ru;

– через ОАО «Агентство Роспечать» – по Каталогу изданий органов научно-технической информации 2017 г., индекс 59990.

СТОИМОСТЬ РЕКЛАМЫ:

2-я и 3-я страницы обложки – 24 000 рублей;

4-я страница обложки – 30 000 рублей;

одна страница внутри журнала – 12 000 рублей.

Печатные материалы, используемые в журнале, являются собственностью редакции.

При перепечатке ссылка на журнал обязательна.

Полученные материалы не возвращаются.

Редакция оставляет за собой право корректорской и редакторской правки публикаций без согласования с авторами.

Журнал распространяется через редакцию по адресной рассылке, через ОАО «Агентство Роспечать», на специализированных выставках и симпозиумах.