

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 N ФС 77-29963
от 17 октября 2007 г.

Главный редактор:

Р.А. Валиулин

Редакционный совет:

М.П. Бадер, д.т.н., профессор
В.Я. Беспалов, д.т.н., профессор
А.С. Веденеев, д.ф.-м.н., доцент
Л.А. Герман, д.т.н., профессор
Ю.М. Иньков, д.т.н., профессор
В.В. Калугин, д.т.н., доцент
А.А. Ковалев, д.т.н.
К.Л. Ковалев, д.т.н., доцент
В.Н. Козловский, д.т.н., доцент
А.С. Космодамианский, д.т.н., профессор
А.И. Попов, д.т.н., профессор
В.Т. Пенкин, д.т.н., доцент
С.Т. Рембеза, д.ф.-м.н., профессор
В.И. Сарбаев, д.т.н., профессор
М.В. Шевлюгин, д.т.н., доцент

Выпускающий редактор:

О.А. Кожухова

Редакция:

140070, Московская область,
Люберецкий район, п. Томилино,
ул. Гаршина, д. 11.

Тел./факс: (495) 500-40-20
E-mail: npptez@mail.ru
Сайт: www.npptez.ru

Журнал издается в электронном виде.

Адрес сайта: eet-journal.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

Тарабин И.В., Титова Т.С., Терёхин И.А., Руммо А.А.

Совершенствование конструкции секционного изолятора 2

Герман Л.А., Серебряков А.С., Осокин В.Л., Дулепов Д.Е., Петров Д.В.

Современная защита и автоматика установки продольной емкостной компенсации тяговой подстанции 7

Червонченко С.С., Фролов В.Я.

Неравномерное распределение нагрузки между выпрямительными агрегатами 14

Канаев А.К., Давыдова А.В.

Разработка обобщенной графоаналитической модели подсистемы мониторинга и управления системой электроснабжения метрополитена 19

Пузаков А.В.

Степень работоспособности выпрямителя автомобильного генератора 24

Зуев С.М., Варламов Д.О.

Специализированные микросхемы для активных устройств балансировки аккумуляторных батарей в автономных электроэнергетических системах 29

Кузнецов Г.Ю.

Применение накопителей энергии в качестве аварийных источников питания на метрополитене 35

Супрун Д.А., Скорик В.Г., Буняева Е.В., Малышева О.А.

Альтернативный алгоритм управления силовым преобразователем электровоза переменного тока в аварийных режимах 38

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОНИКИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ НА ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВАХ

Шаряков В.А., Шарякова О.Л., Марков К.В.

Использование бортовых накопителей энергии на городском рельсовом транспорте 44

ДИАГНОСТИКА И ИСПЫТАНИЯ

Васильев А.В.

Применение вычислительных методов в прогнозировании тепловой нагрузки 49

Доманов В.И., Мурзаков Д.Г.

Структурно-параметрический синтез системы управления ЭТК грузоподъемного механизма 53

Совершенствование конструкции секционного изолятора

// IMPROVEMENT OF THE DESIGN OF A SECTIONAL INSULATOR //

**Тарабин И.В., к.т.н.,
Омский государственный
университет путей сообщения,
г. Омск**

**Титова Т.С., д.т.н.,
Петербургский государственный
университет путей сообщения
Императора Александра I,
г. Санкт-Петербург**

**Терёхин И.А., к.т.н.,
Петербургский государственный
университет путей сообщения
Императора Александра I,
г. Санкт-Петербург**

**Руммо А.А.,
Омский государственный
университет путей сообщения,
г. Омск**

Объектом исследования является секционный изолятор постоянно-го тока.

Цель работы – улучшение технических показателей, конструкции, процесса установки и эксплуатации. Методы исследования – эмпирические, теоретические. Полученные результаты можно использовать в качестве основополагающих данных для производства секционных изоляторов. Степень внедрения: разработана конструкция усовершенствования секционного изолятора.

Ключевые слова: Контактная сеть, секционный изолятор, полимерный изолятор, гидрофобность, техника безопасности, несущий трос, дистанция электроснабжения.

The object of research is a sectional DC insulator. The purpose of the work is to improve the technical performance, design, installation and operation process. Research methods – empirical, theoretical. The results obtained can be used in accordance with data standards for the production of sectional insulators. Degree of implementation: a design for improving the sectional insulator has been developed.

Keywords: contact network, sectional insulator, polymer insulator, hydrophobicity, safety measures, carrying cable, power supply distance.

Введение

В современных условиях мировой экономики, одним из основополагающих факторов для развития промышленного и экономического потенциала любой страны является стабильная работа железной дороги. В Российской Федерации владельцем инфраструктуры общего пользования российских железных дорог выступает ОАО «РЖД». Основные задачи и положения для развития железных дорог представлены в программе «Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года».

Основными целями представленной стратегии являются: к 2030 г. увеличить грузооборот в 1,7 раза, пассажирооборот в 1,3 раза с соблюдением качества перевозок мирового уровня, повышение скорости движения пассажирских поездов и скорость доставки грузов, снижение удельного потребления электроэнергии на тягу поездов на 15 %, повышение показателей безопасности движения поездов.

Повышение технических показателей контактной сети является одной из главных задач. Данная задача позволит уменьшить число повреждений токопроводящих устройств, предоставить положительный экономический эффект в вопросах содержания и эксплуатации устройств электроснабжения железнодорожной инфраструктуры. Повысить качество контактной сети можно обеспечив надежную изоляцию секций благодаря усовершенствованию секционных изоляторов, которые достаточно часто выходят из строя и имеют большое влияние на работу контактной сети в целом.

Целью дипломной работы является улучшение эксплуатационных показателей секционных изоляторов за счет обоснованного продления срока службы и увеличения допустимого износа отдельных его частей в результате изменения технологии его производства.

Согласно системе учета КАСАНТ, за последнюю неполную декаду было выявлено порядка 488 отказов

технических устройств. Секционные изоляторы берут на себя свыше 5% от общего количества отказов. Выделяют две группы отказов секционных изоляторов: электрические и механические. Электрические возникают из-за старения (растрескивания) материала, покрытие поверхности изоляции грязью, превышение допустимого напряжения и отключение разъединителей под нагрузкой. Механические происходят из-за возникновения трещин в отдельных частях секционного изолятора при ударах и вибрации из внешней среды. Для того, чтобы оценить актуальность проведенной работы составлена диаграмма представленная на рисунке 1.

Данная диаграмма показывает, что на протяжении последних восьми лет, в среднем каждые 1,5 года происходит нарушение в работе секционных изоляторов. Также проведенный анализ показывает, что максимальное количество отказов приходится на месяца года с хаотичными температурными режимами,

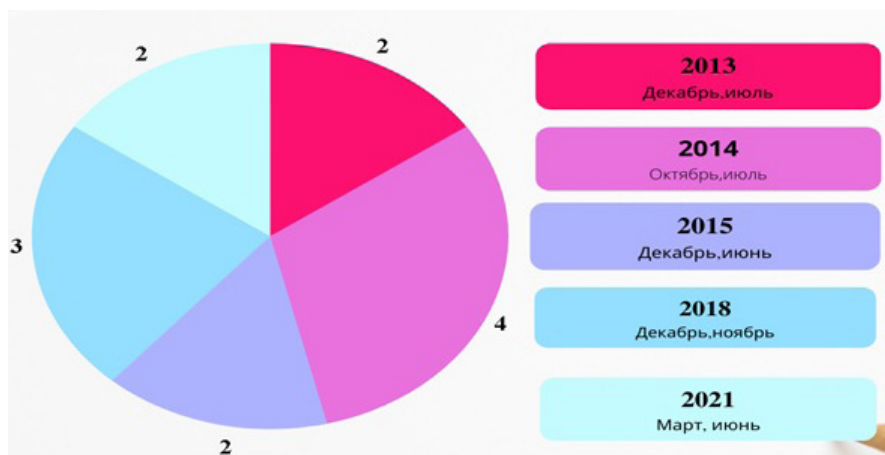


Рис. 1. Распределение отказов секционных изоляторов на ЗСЖД с 2013 – 2021гг.

когда погодные условия достигают максимальных критических значений.

Согласно проведенному статистическому анализу, секционные изоляторы, используемые ОАО «РЖД», являются недостаточно надежными. Основными причинами возникновения нарушений являются:

1. Использование нержавеющей стали в качестве основного материала для металлических скользунов;
2. Использование эпоксидной смолы для заполнения зазоров между металлическим оконцевателем и изолирующим элементом;
3. Использование недостаточной зоны вхождения изолирующего элемента в металлический оконцеватель;
4. Использование разбираемого узла крепления изолирующих элементов с металлическими оконцевателями;
5. Использование неэластичного подвеса, для крепления с несущим тросом;
6. Недостатки эксплуатации (медленная замена изношенного оборудования)

Направления для совершенствования секционного изолятора:

1. Использование качества основного материала скользунов низколегированные сплавы системы Cu-Ni-Si, согласно основным техническим характеристикам представленным в таблице 1, кремнисто-никелевые бронзы являются материалами с хорошим сочетанием высокой прочности, жаропрочности, теплопроводности и электропро-

водности. На данный момент такой сплав используется в производстве антифрикционных деталей, а также в авиастроении и электротехники, но самое главное, что данный сплав получил широкое применение в качестве основного материала для металлических секционных изоляторов эксплуатируемых зарубежом, что доказывает его концептуальность. Анализируя материалы предлагаемые отечественными производителями и предложенные в данной статье можно сделать вывод, что использование низколегированного сплава позволит увеличить срок службы секционного изолятора, так как будет меньше подвергаться износу с внешней стороны. Сплавы системы Cu-Ni-Si имеют большую стоимость, однако технические преимущества позволят снизить процент возникновения поломки в структуре скользунов и предоставляют возможность снизить скорость замены секционного изолятора в целом, так как они на данный момент итак являются недостаточными. В качестве основного материала металлических скользунов в отечественных изоляторах используется нержавеющая сталь марки ALSI 304, цена которой составляет 450р. за 1 кг., стоимость низколегированного сплава составляет 560р. за 1 кг.

Таблица 1. Технические характеристики нержавеющей стали и сплава системы Cu-Ni-Si

Материал	Твердость	Электропроводность	Прочность на разрыв	Удлинение
		IACS %	Н/мм ²	A5 %
ALSI 304	130-150	7.56	621	65-50
Cu-Ni-Si	170-190	38-45	650-800	9-15

1. Изолирующим элементом в секционном изоляторе является полимерный изолятор с фторопластовой оболочкой, типа НСФТ. Данные изоляторы состоят из двух металлических оконцевателей, фторопластовой трубки и стеклопластиковым стержнем. Процесс производства полимерных изоляторов допускает образование зазоров между зонами «оконцеватель – стержень», отечественные производители заполняют данный зазор эпоксидной смолой марки ЭД-20, которая допускает возникновение микротрещин. Причиной образования микротрещин, является химический контакт стеклопластика и связывающих веществ, особенно кислотного раствора, то есть образование микротрещин связано с коррозией материала стеклопластика под действием механической нагрузки при опрессовке. Когда кислота контактирует со стекловолокнами, происходит ионный обмен между кислотой и стеклянной решеткой. В следствии чего повышается механическая нагрузка на поверхность стеклопластика и образуются микротрещины на поверхности стержня. Эпоксидная смола обладает недостаточными техническими характеристиками для подавления возникающей механической напряженности, что приводит к образованию в ней микротрещин, которые в дальнейшем могут распространиться вблизи стекловолокна.

Для решения данной проблемы необходимо использовать абразивный или металлический порошок. В процессе опрессовки, порошок позволит равномерно распределить механическое усилие вдоль стержня и предотвратит возникновение микротрещин. Опрессованный в замкнутом пространстве материал станет твердым и позволит надежно удерживать стержень. Металличе-

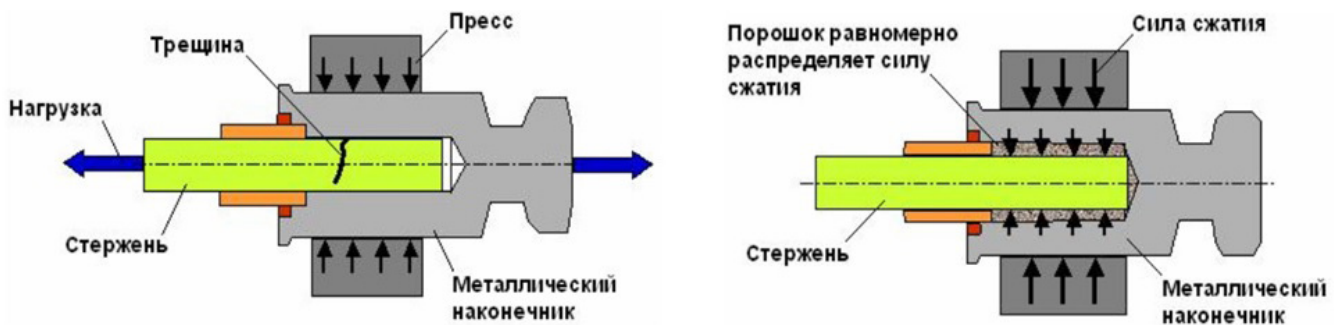


Рис. 2. Процесс опрессовки металлического оконцевателя: а) – традиционный способ, б) – предлагаемый способ

ские порошки обладают хорошей текучестью, а благодаря своей структуре и возможности облегченного прессования, что предоставляет возможность создания любой необходимой формы оконцевателя. Металлический порошок обладает высокой износостойкостью, является более экономичным так как производство порошка возможно из сплавов или остаточного материала. Процесс опрессовки полимерного изолятора представлен на рисунке 2.

Целесообразность данного решения также связана с положительным экономическим эффектом. стоимость ранее используемой эпоксидной смолы марки ЭД-20 составляет 640р. за 1кг., стоимость металлического порошка представленного ранее составляет 35р. за 1 кг.

3. Зона вхождения фторопластовой трубки и стеклопластикового стержня, рисунок 2, является недостаточной, так как возможно возникновение хрупкого излома. В большинстве случаев он происходит внутри металлических оконцевателей изолирующих элементов, где распределение механических воздействий вдоль стержня особенно неравномерно или на расстоянии 5-10 см выше нижнего оконцевателя, где при отсутствии экранов наблюдается наибольшая напряженность электрического поля. Зона вхождения 15мм согласно паспортным данным используемых изоляторов, (рисунок 3,а). Чтобы уменьшить силу механических напряжений необходимо увеличить площадь ее приложения, (рисунок 3,б). Давление – это физическая величина характеризующая силой действующей перпендикулярно поверхности, к площади этой поверхности, соответственно увеличив площадь зоны вхождения в полимерном изоляторе в 3 раза,

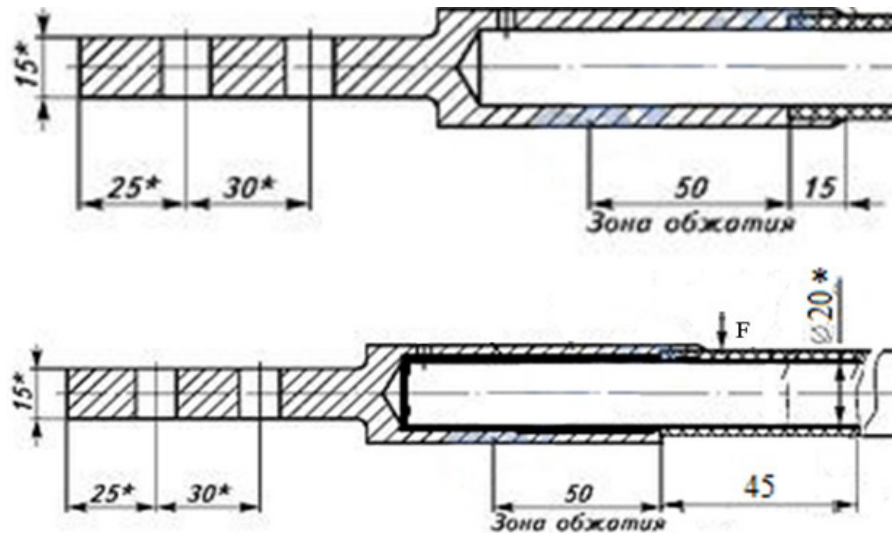


Рис. 3. Конструктивное исполнение изолятора типа НСФт: а) – исходный вариант, б) – предлагаемый вариант.

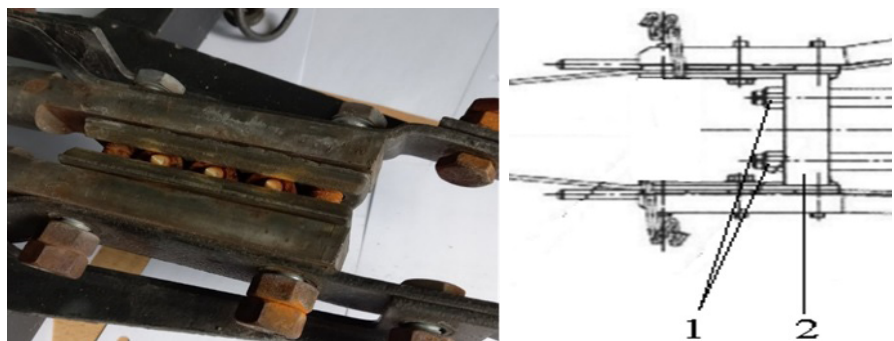


Рис. 4. Узел крепления секционного изолятора: а) – исходный вариант, б) – предлагаемый вариант. 1 – стопорные болты для регулировки изолирующих элементов, 2 – цельнолитой узел крепления

можно достигнуть уменьшения механического напряжения также в 3 раза, что предоставит необходимый результат.

4. Узел крепления изолирующих элементов с опорной конструкцией секционного изолятора представлен на рисунке 4,а. Узел крепления состоит из двух металлических пластин и двух стопорных болтов которые сжимают пластины. В случае ослабления хотя бы одного стопорного болта происходит нарушение крепления всей конструкции, также

при повреждении изолирующего элемента становится невозможно собственноручно и моментально произвести его замену, так как через узел крепления проходит контактный провод. Для повышения надежности узла крепления целесообразней использовать цельнолитую конструкцию, рисунок 4,б. Представленный образец позволит предотвратить процесс расшатывания конструкции, позволит производить замену изолирующих элементов не снимая секционный изолятор с кон-

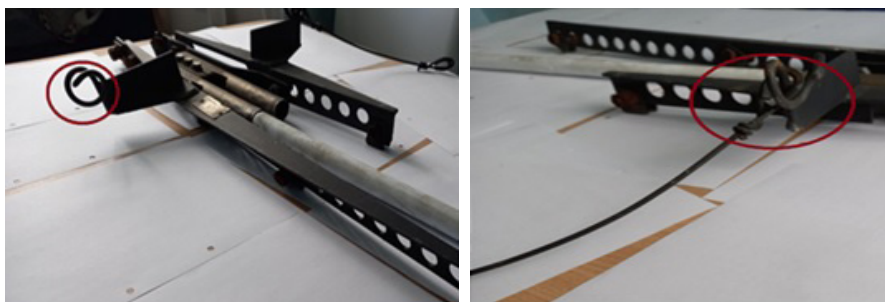


Рис. 5. Подвес секционного изолятора ИС-3-80-3: а) – подвес, б) – подвес с металлической струной

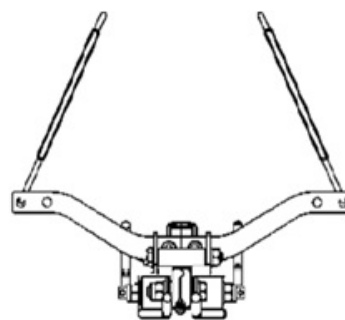


Рис. 6. Конструктивное исполнение подвеса секционного изолятора

тактной сети и уменьшит общую массу изолятора, что уменьшит процесс растяжения контактного провода.

5. В качестве последней причины возникновения нарушений в работе секционного изолятора выступает подвес. Подвес осуществляет крепление секционного изолятора с несущим тросом. Подвес должен представлять собой надежную конструкции способную амортизировать секционный изолятор при проходе под ним токоприемника ЭПС. Подвес отечественных секционных изоляторов состоит из двух металлических струн и двух металлических закругленных отверстий к которым крепятся этим металлические струны, рисунок

Для создания надежного крепления с несущим тросом и повышения

амортизации секционного изолятора необходимо применить цельнолитую конструкцию, с более плотной струной позволяющей регулировать высоту подвеса, на рисунке 6 представлено конструктивное решение подвеса секционного изолятора.

Основными преимуществами данной системы подвеса являются:

1) Использование загнутой металлической рамы, для создания баланса между двумя сторонами.

2) Использование металлических струн позволяющих регулировать высоту подвеса, рисунок 7.

В общем виде идеальный секционный изолятор представляет собой комбинацию надежной системы подвеса, узла крепления, применение в процессе производства цилиндрической матрицы при опрессовки

металлических оконцевателей а также использование металлического порошка для заполнения зазоров между оконцевателем, стержнем и защитной оболочкой. В котором в качестве основного материала для скользунов послужит низколегированный сплав системы Cu-Ni-Si. На рисунке 7 представлена конструкция разработанного в статье секционного изолятора.

Данная модель секционного изолятора позволит повысить мобильность всей конструкции тем, что предоставляет возможность замены любого элемента не снимая секционный изолятор с контактной сети, в отличии от эксплуатируемых секционных изоляторов на данный момент, регулировка и настройка которых осуществляется только на территории завода-производителя. Надежная система подвеса позволит создать необходимый уровень амортизации, уменьшит ударную нагрузку о токоприемник ЭПС, включает в себя кронштейн для прохождения контактного провода, что в свою очередь снимает эти полномочия с узла крепления и позволяет производить замену изолирующих элементов на месте. Использование низколегированного сплава в качестве основного материала скользу-



Рис. 7. Предложенный вариант подвеса: а) – металлические струны, б) – регулировка металлических струн

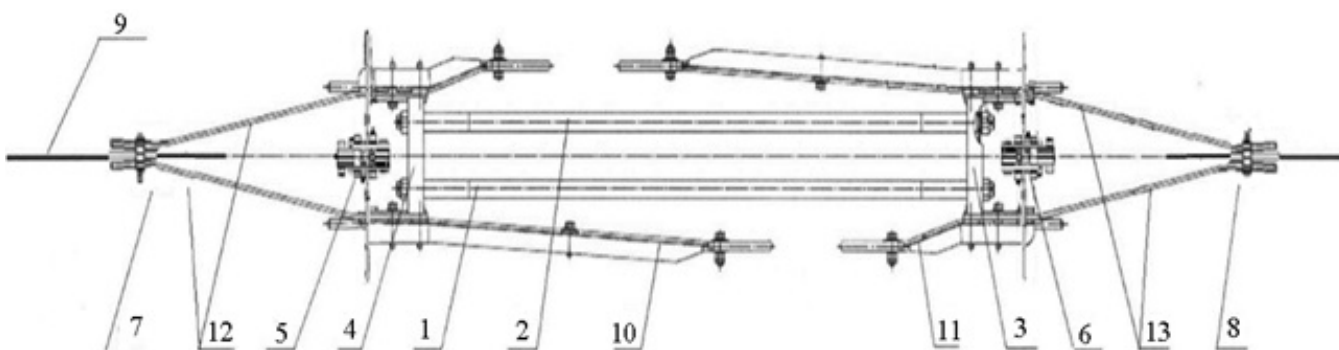


Рис. 8. Конструктивное исполнение разрабатываемого секционного изолятора: 1,2 – изолирующие элементы, 3,4 – кронштейн, 5,6 – подвес, 7,8 – соединительные зажимы, 9 – контактный провод, 10,11 – держатели рогов, 12,13 – скользуны

нов позволяет уменьшить общую массу конструкции, и повысить ее технические характеристики, а надежность работы изолирующих элементов обусловлена применением металлического порошка который позволит предотвратить возникновение трещины на ряду с увеличением площади вхождения стеклопластикового стержня и фторопластовой оболочки в металлических оконцевателях.

Литература

1. Тарабин, И. В. Методические указания к выполнению контрольной работы по дисциплине "Техника высоких напряжений и электротехнические материалы". 2011. – 31 с.
2. Тарабин, И. В. Повышение качества токосъема в местах расположения секционных изоляторов и фиксаторных узлов скоростных контактных подвесок. 2008. – 16 с.
3. Хрулев В.М. Зависимость оптимальной толщины клеевой прослойки от шероховатости соединяемых поверхностей и реологических свойств клея. // Механика полимеров. 1965
4. Генкин С.М., Горошков Ю.И., Морозова Т.В. Полимерные материалы в контактной сети. М.: Транспорт, 1976–96с

Тарабин Игорь Валерьевич.

Родился в 1981 году. Окончил Омский государственный университет путей сообщения по специальности «электроснабжение железнодорожного транспорта». Кандидат технических наук, защитил диссертацию по теме «Повышение качества токосъема в местах расположения секционных изоляторов и фиксаторных узлов скоростных контактных подвесок» в 2008 году. В настоящее время работает доцентом кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Омского государственного университета путей сообщения. Имеет более 30 научных трудов.

Титова Тамила Семеновна

Окончила Северо-Западный заочный политехнический институт по специальности «Электрические машины». Доктор технических наук, профессор. В 2005 году защитила диссертацию на тему «Комплексная оценка влияния новых природозащитных технологий на геологическую обстановку». Опыт работы – 40 лет. В настоящее время работает первым проректором – проректором по научной работе, заведующей кафедрой «Техносферная и экологическая безопасность» ПГУПС. Имеет более 200 научных трудов, в том числе 26 монографий и учебников, 44 патента, 13 зарубежных публикаций. Почетный железнодорожник, заслуженный деятель науки Российской Федерации.

Терёхин Илья Александрович

Родился в 1991 году. В 2013 году окончил Омский государственный университет путей сообщения по специальности «Энергообеспечение предприятий». Кандидат технических наук, доцент. В 2018 году защитил диссертацию по теме «Совершенствование системы заземления опор контактной сети в тяговом электроснабжении переменного тока». Опыт работы – 8 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры «Электроснабжение железных дорог», начальником Управления воспитательной работы и производственного обучения. Имеет 41 научный труд.

Руммо А.А.,

Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск

Tarabin Igor.

Born in 1981. Graduated from the Omsk State Transport University with a degree in Railway Power Supply. Candidate of Technical Sciences, defended his thesis on the topic "Improving the quality of current

collection at the locations of sectional insulators and fixing units of high-speed contact suspensions" in 2008. Currently, he works as an assistant professor at the Department of Power Supply of Railway Transport at the Omsk State Transport University. He has more than 30 scientific papers.

Titova Tamila.

She graduated from North West Correspondence Polytechnic Institute majoring in "Electric machines". She is a doctor of technical sciences, professor. In 2005 she defended the dissertation with topic "Complex assessment of the impact of new environmental protection technologies to the geological situation". She has 40 years of work experience. At present she works as the first vice-rector – vice-rector for scientific work, chief of Technospheric and environmental safety department of PGUPS. She has more than 200 scientific works, including 26 monographs and training manuals, 44 patents, 13 abroad publications. She is honored railway employee, honored scientist of Russian Federation.

Terekhin Ilya

Was born in 1991. In 2013 he graduated from the Omsk State Transport University with a degree in "Power Supply for Enterprises". Candidate of Engineering sciences, Associate Professor. In 2018 he defended thesis on the topic "Improving the grounding system of overhead contact network supports in AC traction power supply". Work experience – 8 years. Currently works as an associate professor of the department "Power supply of railways", head of the Department of educational work and industrial training. Has 41 scientific papers.

Современная защита и автоматика установки продольной емкостной компенсации тяговой подстанции

// MODERN PROTECTION AND AUTOMATION OF THE INSTALLATION OF A LONGITUDINAL CAPACITIVE WALK-THROUGH TRACTION SUBSTATION //

Герман Л.А., д.т.н., профессор,
филиал Самарского государственного университета путей сообщения в Нижнем Новгороде,
г. Нижний Новгород

Серебряков А.С., д.т.н., профессор,
Нижегородский государственный инженерно-экономический университет,
г. Нижний Новгород

Осокин В.Л., к.т.н.,
Нижегородский государственный инженерно-экономический университет,
г. Нижний Новгород

Дулупов Д.Е., к.т.н.,
Нижегородский государственный инженерно-экономический университет,
г. Нижний Новгород

Петров Д.В.,
ООО «СиТри Солюшнз»,
г. Москва

Установки продольной емкостной компенсации (УПК) на шинах 27,5кВ компенсируют сопротивление тягового трансформатора и системы внешнего электроснабжения и теоретически при любой тяговой нагрузке можно получить на тяговых шинах напряжение близкое к холостому ходу источника питания. На УПК устанавливаются сверхбыстродействующую защиту на тиристорном ключе (ТК). С помощью

математического моделирования доказано, что с целью существенного снижения опасных перенапряжений на конденсаторах в аварийных ситуациях команду на запуск тиристорного ключа следует подавать по току КЗ, что до минимума снижает длительность протекания мощных токов КЗ. Таким образом, защита УПК от мощных токов КЗ должна быть выполнена с помощью тиристорного ключа с запуском по току КЗ, а при удаленных токах КЗ в тяговой сети, ограничение токов КЗ УПК происходит при срабатывании тиристорного ключа с запуском по напряжению УПК с последующим отключением токов КЗ. Предлагается защиту от перегрузки конденсаторов УПК выполнить с помощью тиристорного ключа с запуском по напряжению УПК и с реле с зависимой выдержкой времени. После шунтирования УПК тиристорным ключом возможно определить по небалансной защите неисправность конденсаторов после КЗ и далее следует решать вопрос о целесообразности повторного включения УПК в работу.

Ключевые слова: продольная емкостная компенсация, сверхбыстродействующая защита, автоматика, запуск тиристора по току, перегрузка конденсаторов, повторное включение.

Installation of longitudinal capacitive compensation (ILC) on 27.5 kV buses compensate for the resistance of the traction transformer and the external power supply system, and theoretically, with any traction load, it is possible to obtain voltage close to the idling of the power source on traction buses. Superfast protection on thyristor switch (TS) is installed on ILC. With the help of mathematical modeling, it is proved that in order to significantly reduce dangerous overvoltages on capacitors in emergency situations, the command to start the thyristor switch should be transmitted via the short-circuit current, which minimizes the duration of the flow of powerful short-circuit currents. Thus, ILC protection from short-circuit high-power currents should be performed using thyristor switch with short-circuit current start, and at remote short-circuit currents in the traction network, limitation of ILC short-circuit currents occurs when the thyristor switch is triggered with start-up by ILC voltage with subsequent disconnection of short-circuit currents. It is proposed to perform overload protection of the ILC capacitors using thyristor switch with starting by the ILC voltage and with relay with a dependent time delay. After shunting the ILC with thyristor switch, it is possible to determine the failure of capacitors after short circuit by unbalanced protection, and then the question of whether it is advisable to re-activate the ILC in operation should be resolved.

Keywords: longitudinal capacitive compensation, superfast protection, automation, start of thyristor by current, overload of capacitors, re-activation.

Установки продольной емкостной компенсации (УПК) – мощное средство повышения и стабилизации напряжения в тяговой сети путем компенсации индуктивного сопротивления предвключенной линии

[1]. При установке продольной емкостной компенсации на шинах 27,5кВ компенсируется реактивное сопротивление тягового трансформатора и системы внешнего электроснабжения (СВЭ). В этом случае

теоретически при любой тяговой нагрузке можно получить на тяговых шинах напряжение близкое к холостому ходу источника питания.

Проблеме включения УПК в тяговую сеть посвящено немало публи-

каций [1 -13], в которых рассмотрены схемы и конструкции УПК, места их включения, режимы работы, схемы защит и их эффективность. Однако в нормативном документе [14] «Защита систем электроснабжения железной дороги от коротких замыканий и перегрузки» отсутствует раздел по принципам и правилам построения защиты УПК. Поэтому задача статьи – показать целесообразную схему защиты и автоматики УПК, а также дать теоретическое обоснование её параметров.

1. Токи КЗ в системе электроснабжения с УПК

В соответствие с [3] для широко применяемой схемы УПК в отсасывающем проводе тяговой подстанции (ТП) с трансформаторами Y/Δ предложено определять оптимальное емкостное сопротивление УПК по формуле

$$X_{УПК} = X_{П}$$

где $X_{П}$ – сопротивление фазы тяговой подстанции (сопротивление трансформатора плюс сопротивление СВЭ).

В этом случае значительно снижается разность напряжений плеч питания, что приводит к снижению несимметрии, а при равных токах плеч питания эта разность равна нулю. При этом потери напряжения на плече от тока этого же плеча снижается в два раза.

Важно отметить, что УПК в отсасывающем проводе воздействует на напряжение обоих плеч питания. При необходимости большего снижения напряжения следует увеличивать емкостное сопротивление УПК. Учитывая, что потери напряжения на тяговой подстанции переменного тока с трансформатором Y/Δ определяются удвоенным сопротивлением фазы подстанции, емкостное сопротивление УПК для достижения заданного напряжения может быть увеличено до $(1,5-1,7)X_{П}$.

Однако, применение УПК вызывает существенное увеличение токов КЗ. Для предотвращения повреждений при повышенных токах КЗ предложены сверхбыстродействующие защиты конденсаторов УПК [3,13,15,16].

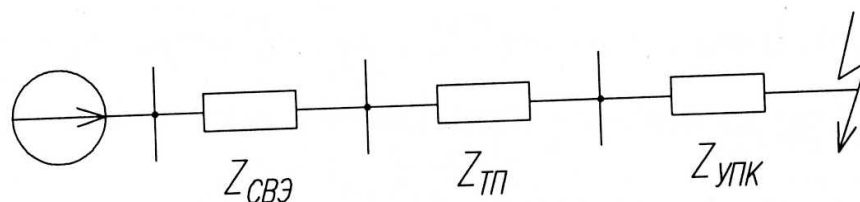


Рис. 1. Схема замещения КЗ в тяговой сети у подстанции с УПК

В [15,16] рассмотрены защиты на тригатроне с тиристорным ключом, а в [13] предложены тиристорные ключи, шунтирующие УПК при КЗ с последующим отключением токов КЗ. При КЗ в контактной сети вблизи тяговой подстанции со схемой Y/Δ (рис.1) ток двухфазного КЗ равен [17]

$$I_{КЗ} = U / (2Z_{СВЭ} + 2Z_{ТП} + Z_{УПК}), (1)$$

где U – напряжение источника питания (принимается приведенное напряжение -27,5кВ); $Z_{СВЭ} = R_{СВЭ} + jX_{СВЭ}$ – фазное сопротивление СВЭ, подключенное к тяговому трансформатору, Ом; $Z_{ТП} = R_{ТП} + jX_{ТП}$ – фазное сопротивление трансформатора, Ом; $Z_{УПК} = -jX_{УПК}$ – сопротивление УПК, Ом.

Все сопротивления приведены к напряжению тяговой обмотки

трансформатора. Обычно сопротивления линий электропередачи напряжением свыше 110кВ учитывают только индуктивными сопротивлениями, сопротивление трансформатора – практически индуктивное, сопротивление УПК – емкостное.

Анализ переходных процессов в системе с УПК и приведенными выше данными был выполнен в интегрированном пакете MATHCAD. Программа решения дифференциальных уравнений численным методом Рунге-Кутты четвертого порядка с использованием стандартной функции **rkfixed** приведена на рис.2. Там же дана осциллограмма переходного процесса. Осциллограмма (рис.2) процесса КЗ в системе с УПК свидетельствует о значительном превышении тока и напряжения на конденсаторах УПК в режиме КЗ по сравнению с нормальным режи-

```

E(t) := 27.5*sqrt(2)*sin(314t)    L1 := 0.025    LE := 0.07    RE := 27
LE(t) := if(t < 0.143, LE, 0.1LE)    RE(t) := if(t < 0.143, RE, 0.1RE)
R1 := 1.5    C := 10^-3    RC := 10^6    RC(t) := if(t < 0.345, 10^6, 1)
x := (-0.16, -0.59)
D(t, x) := [ (E(t) - x0*(R1 + RE(t)) - x1) / (L1 + LE(t)), 1/C * (x0 - x1/RC(t)) ]
Z := rkfixed(x, 0, 0.5, 5000, En := 0..5000)
tn := Zn,0    in := Zn,1    un := Zn,2    E1n := 27.5*sqrt(2)*sin(314*tn)

```

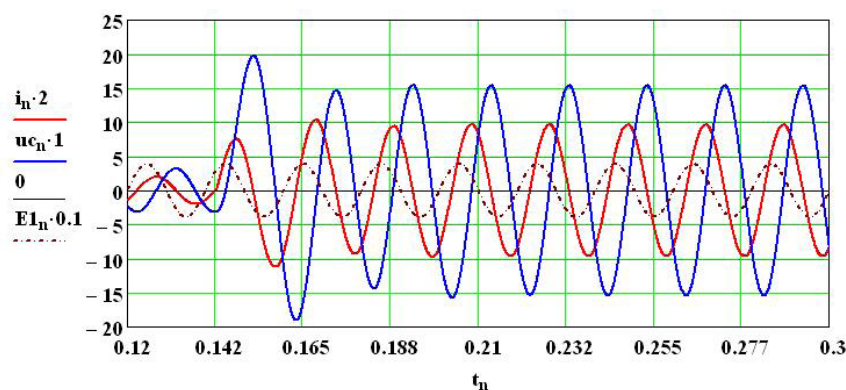


Рис. 2. Программа решения дифференциальных уравнений в интегрированном пакете MATHCAD. Осциллограмма процесса КЗ с УПК (i_n (красная кривая) – ток УПК; u_n (синяя кривая) – напряжение УПК; $E1n$ (пунктирная) – напряжение источника питания)

мом. Как видно, бросок напряжения на КУ достигает 20 кВ, что значительно превышает напряжение в нормальном режиме (3-5 кВ). Таким образом, становится ясной основная проблема внедрения УПК. Она заключается в том, что громадные токи КЗ, значительно превышающие токи КЗ без УПК, снижают надежность работы электрооборудования тяговых подстанций и самих УПК и требуют разработки мероприятий для их надежной защиты.

Известным мероприятием по снижению токов КЗ и перенапряжений на конденсаторах УПК является быстродействующее шунтирование конденсаторов УПК тиристорным ключом.

Как видно (рис.2), переходный процесс при возникновении КЗ длится не более 1,5 – 2 периодов, и поэтому в дальнейшем будем ограничивать анализ процесса КЗ в осциллограммах двумя периодами.

Для примера на рис.3 представлены осциллограммы для следующих исходных данных: $Z_{свз} = 0,3 + j10\text{ Ом}$, $Z_{тр} = 0,1 + 2\text{ Ом}$, $X_{упк} = 30\text{ Ом}$, напряжение питания – 27,5кВ, исходная тяговая нагрузка – 1000А с $tg\varphi = 0,8$.

На осциллограмм рис. 3,а – ток КЗ возникает в ноль тока нагрузки, а на рис.3,б – КЗ возникает в максимум тока, все промежуточные ситуации возникновения КЗ расположены между этими крайними

точками. Как и следовало ожидать, в переходном периоде и далее напряжение УПК отстает от тока. Отсюда естественное следствие: момент команды на шунтирование УПК тиристорным ключом следует подавать по току УПК, а не по напряжению, что уменьшит время действия тока КЗ.

Этот факт был зафиксирован в изобретении [16], но к сожалению, не был четко указан в проектной и нормативной документации по УПК.

При КЗ в тяговой сети вблизи тяговой подстанции с УПК сопротивление в месте КЗ снижается в $2X_p / X_p[1 - (0,5 - 0,3)]$ раз и, следовательно, максимальный ток КЗ возрастает в 4 – 6,6 раз.

2. Защиты УПК от токов КЗ

Применяемые сверхбыстродействующие защиты на тиристорах [3,17] предотвращают повреждение аппаратуры УПК, о чем свидетельствует опыт эксплуатации. Однако, на наш взгляд, есть возможность снизить аварийные токи и напряжения УПК путем совершенствования её защиты. Как было указано выше, команду на шунтирование УПК при КЗ следует подавать по мгновенному току КЗ. Например, уставка по току (амплитудное значение) – 2500А (на рис.3,а это значение – 5кА по шкале ординат при времени 0,146с), то есть в это мгновение будет подана команда на шунтирование УПК

тиристором. В это же мгновение напряжение на конденсаторах УПК – около нуля. Аналогичная картина и на рис 3,б, когда возникновение КЗ происходит в максимум тока. Итак, теоретически подтверждена идея необходимости срабатывания тиристорного ключа по мгновенному значению тока КЗ. Реализация этой идеи рассмотрена в изобретении [18]. Если же срабатывание ТК происходило бы по напряжению, то так как напряжение здесь отстаёт от тока, то увеличивалось бы время шунтирования УПК.

Например, как видно по рис.4, тиристорный ключ ТК срабатывает при мгновенном значении тока в 2,5кА (на рис.4.а отметка 5кА на 0,155сек, а на рис 4,б отметка 5кА на 0,145сек), практически напряжение на конденсаторах остается таким же, как и в до аварийный период, что подтверждает разработки [18].

Если по каким-либо причинам произойдет запаздывание срабатывания ТК, то на конденсаторах УПК возникнет недопустимое повышение напряжения. Для подтверждения указанного представлена осциллограмма (рис.5), где тиристор с запаздыванием включается в момент 0,162сек. По осциллограмме видно повышение напряжения на УПК до недопустимого значения 20 кВ.

Уставку по напряжению УПК для срабатывания ТК целесообразно установить в $1,5U_{упк.н}$ (где $U_{упк.н}$ – номинальное напряжение УПК, амплитудное значение).

Итак, формируется следующий алгоритм работы защиты УПК (рис.6). При мощных КЗ (то есть при близких КЗ в тяговой сети), когда необходимо сверхбыстрое шунтирование УПК, работает ТК с запуском по току, а при удаленных КЗ, когда не работает запуск по току, срабатывает запуск по напряжению с последующим шунтированием конденсаторов УПК.

В типовом проекте УПК НИИЭФА-ЭНЕРГО использованы оба варианта запуска тиристорного ключа (по току и по напряжению), но не уточнено назначение каждого. В проекте НИИЭФА-ЭНЕРГО сказано: «.....Предусмотрены два канала защиты конденсаторной батареи при

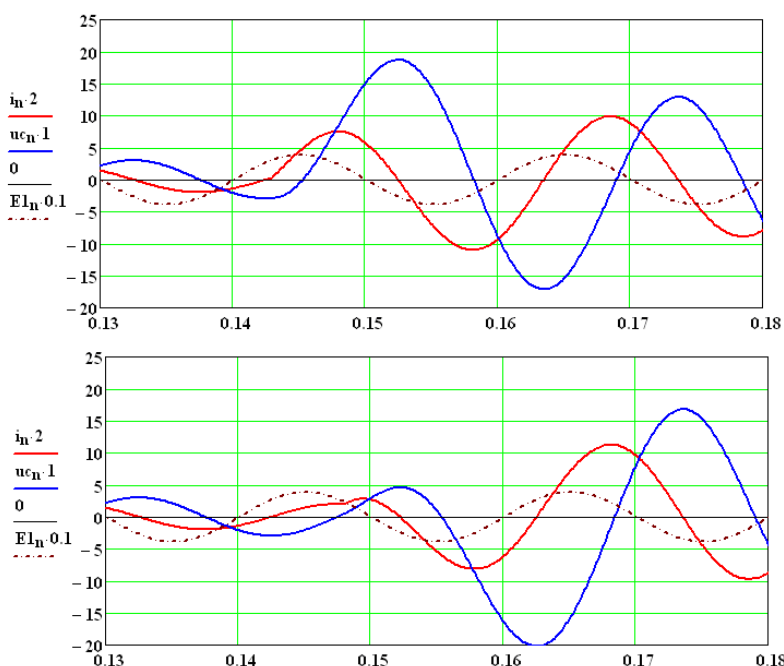
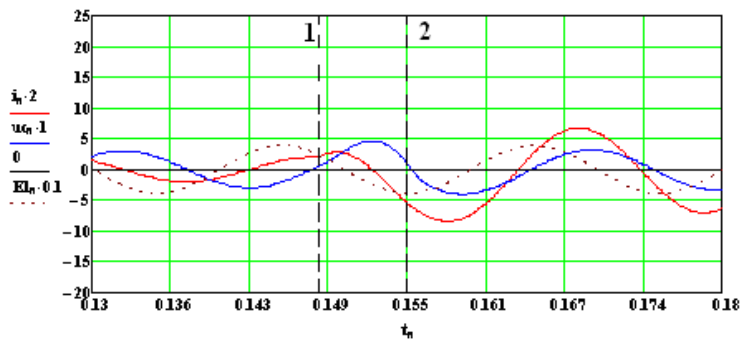
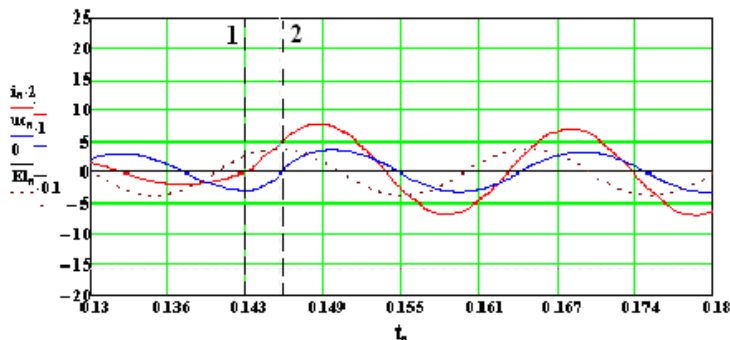


Рис. 3. Осциллограмма возникновения КЗ в ноль и максимум тока



a



б

Рис. 4. Осциллограммы при работе тиристорного ключа (вертикальные штриховые линии: 1- начало КЗ, 2 – срабатывание ТК по току

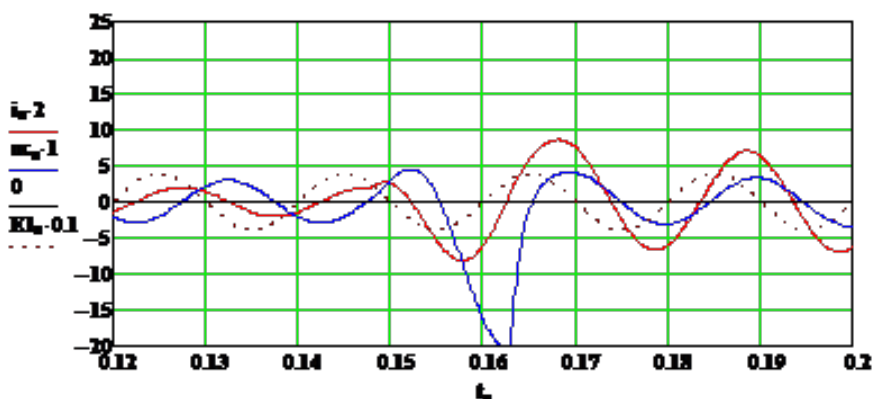


Рис. 5. Осциллограмма процесса при задержке момента включения тиристорного ключа

превышает 1 мс. При срабатывании ТК включается быстродействующий замыкатель на основе вакуумной камеры с временем менее 10 мс, шунтирующий ТК [13], и далее отключает КЗ соответствующий выключатель питающей линии контактной сети. Аналогично происходит вывод УПК из работы и при перегрузке при срабатывании блока Б2.

3. Автоматика УПК с контролем целостности конденсаторов после аварийного отключения

После срабатывания тиристорного ключа для шунтирования УПК в аварийном процессе между конденсаторами УПК и индуктивностью цепи шунтирования (рис.6) протекают послеаварийные токи, причем в связи образующимся контуром L-C происходит усиление высших гармонических токов низкого порядка. Практические измерения показали, что для реальных параметров УПК резонансная частота равна 160-490 Гц и указанные послеаварийные токи могут достигать 800-1000А. Таким образом, при зашунтированном УПК возможна проверка целостности конденсаторов (или, по крайней мере, проверка значительных отклонений емкости конденсаторов от номинальных значений) с помощью установленной небалансной защиты конденсаторов С1-С2-С3-С4 и трансформатора тока ТА2 [18,19] (рис.6).

Выводы

1. Включение УПК на тяговой подстанции на шинах 27,5 кВ повышает токи КЗ, что снижает надежность работы контактной сети и оборудования тяговой подстанции. Поэтому УПК следует оснащать сверхбыстродействующими защитами, одним из вариантов которых является шунтирование УПК с последующим отключением тока КЗ.

2. С помощью математического моделирования доказано, что с целью существенного снижения опасных перенапряжений на конденсаторах в аварийных ситуациях команду на запуск тиристорного ключа следует подавать по току КЗ, что до минимума снижает длительность КЗ.

КЗ в тяговой сети – канал по току (амплитудное значение) и канал по напряжению (амплитудное значение), которые формируются от трансформаторов тока и напряжения. Тиристорный ключ обеспечивает шунтирование конденсаторной батареи УПК с первого полупериода до включения шунтирующего короткозамыкателя Qш».

На основании вышесказанного уточним алгоритм работы защиты УПК.

1. Основной защитой УПК считать защиту с шунтированием УПК тиристорным ключом:

– с запуском по току с уставкой 2-2,5 In (In – номинальный ток УПК, амплитудное значение) с наимень-

шим временем срабатывания с блоками Б1 (защита от КЗ),

– и с запуском по напряжению с уставкой 1,5U_{уп.н}.

2. Предлагаем защиту конденсаторов от перегрузки осуществить с помощью реле напряжения, питающего от трансформатора напряжения. Конденсаторы УПК допускают различную кратность перегрузки в зависимости от её длительности. Поэтому и защита от перегрузки (блок Б2) должна иметь зависимую выдержку времени.

Итак, при КЗ срабатывает тиристорный ключ с запуском по току и по напряжению с блоками Б1 и Б2, время на шунтировку конденсаторов УПК тиристорным ключом не

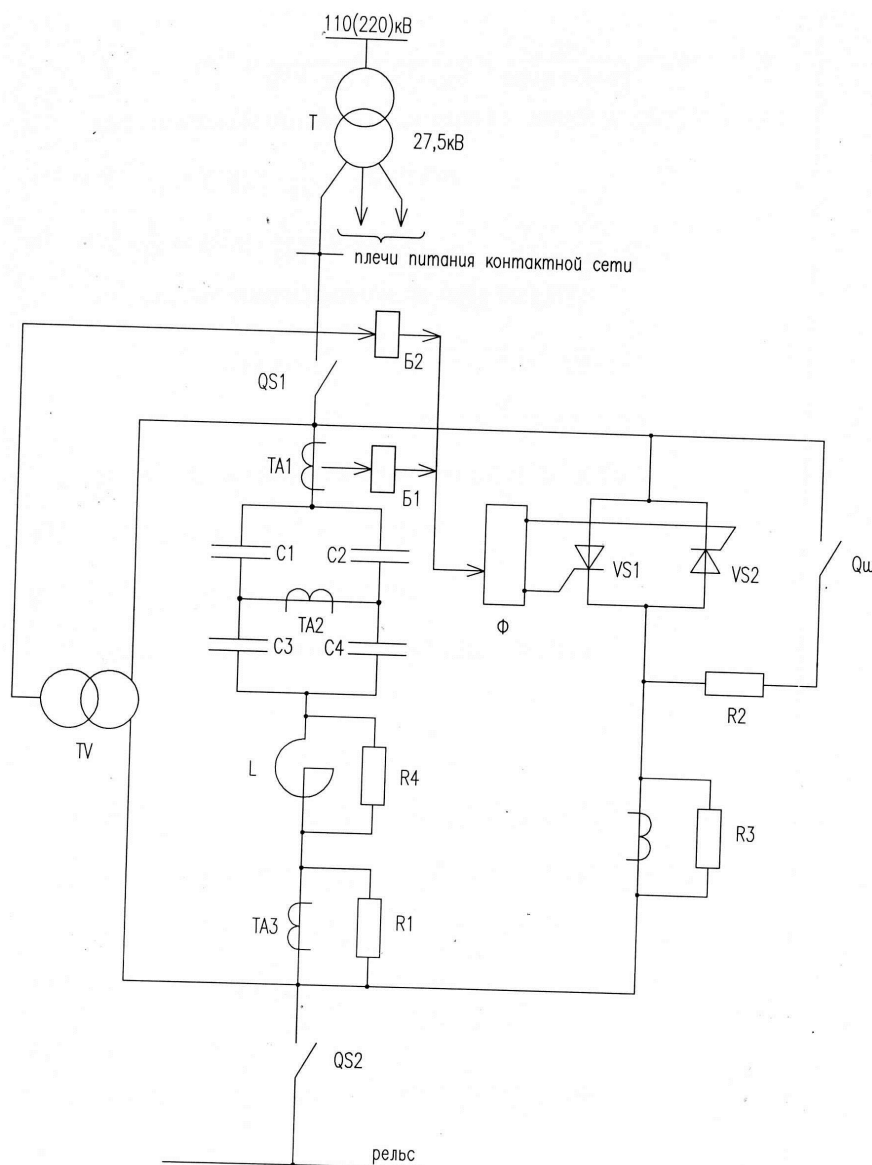


Рис. 6. Схема защиты и автоматики УПК в отсасывающем проводе

3. Защита УПК от мощных токов КЗ должна быть выполнена с помощью тиристорного ключа с запуском по току КЗ, а при удаленных токах КЗ в тяговой сети, когда не срабатывает тиристорный ключ по току, ограничение токов КЗ УПК происходит при срабатывании тиристорного ключа с запуском по напряжению УПК.

4. Предлагается защиту от перегрузки конденсаторов УПК выполнить с помощью тиристорного ключа с запуском по напряжению УПК и с реле с зависимой выдержкой времени.

5. После шунтирования УПК тиристорным ключом возможно определить по небалансной защите неисправность конденсаторов после КЗ и далее следует решать вопрос о целесообразно-

сти повторного включения УПК в работу.

Литература

1. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1982 – 528
2. Тамазов А.И. Несимметрия токов и напряжений, вызываемая однофазными тяговыми нагрузками. М.: Транспорт, 1965, 235с.
3. Бородулин Б.М., Герман Л.А., Николаев Г.А. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1983, 183с.
4. Шенкман Л.З. Продольная емкостная компенсация на стороне высокого напряжения трансформаторов тяговых подстанций // Труды МИИТ, вып.166. М.:Транспорт,1963. С.127-136.

5. Молин Н.И. Улучшение режима напряжения тяговой сети переменного тока устройствами продольной компенсации. Автореферат дисс. на соиск.уч.степ. к.т.н. М.: ВНИИЖТ – 1977.

6. Мамошин Р.Р. Повышение качества энергии на тяговых подстанциях переменного тока. М.: Транспорт,1973, 224 с.

7. Мамошин Р.Р., Зимакова А.Н. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1980, 296 с.

8. Шелом И.А. Продольная емкостная компенсация в отсасывающем проводе тяговой подстанции. М.: ЦНИИЭИ МПС,1969. С.22-34.

9. Шелом И.А. Продольная емкостная компенсация в отсасывающем проводе тяговой подстанции. Автореферат дисс. на соиск. уч.степ. к.т.н. М.: МИИТ – 1980.

16. Патент №2592862 от 02.06.15. Способ регулирования напряжения на тяговой подстанции переменного тока. Оpubл.27.07.16.Бюлл.№21.

10. Коршунов В.А. Продольная емкостная компенсация в тяговой сети // Электричество. 1965. № 1. С. 23-29

11. Караев Р.И., Волобринский С.Д., Ковалев И.Н. Электрические сети и системы. М.:Транспорт, 1988, 326с.

12. Варенцов В.М., Сорин Б.П. Методика расчета продольной емкостной компенсации при заданных размерах движения поездов// Электрификация, развитие электроэнергетической инфраструктуры и электрического подвижного состава скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта Материалы VIII Международного симпозиума «Элтранс-2015». 2017. С. 77–84.

13. Гончаренко В.П., Мизинцев А.В., Молин Н.И. Устройство продольной компенсации тяговых подстанций переменного тока. Элтранс-2009. «Электрификация, инновационные технологии...» С-Петербург, ПГУПС,2010 с.355-362.

14. Сборник СТО РЖД. Защита систем электроснабжения железной дороги от коротких замыканий и перегрузки. Часть 1-5. М.: ОО «Центр инноваций и Развития «Техинформ». 2019., 304с.

15. Патент №716106 от 10.07.78. Способ защиты установки продольной емкостной компенсации от перенапряжений (Герман Л.А. и др.). Оpubл. 15.02.80. Бюлл. №6

16 Патент 997174 от 03.09.81. Устройство для защиты продольной емкостной компенсации (Герман Л.А. и др.). Оpubл. 15.02.83.

17. Фигурнов Е.П. Релейная защита. Учебник. Часть 2. М.: ГОУ УМЦ. 2009. – 604с

18. Патент 1283892 от 22.04.85. Устройство для защиты установки продольной емкостной компенсации от коротких замыканий. (Герман Л.А. и др.). Оpubл. 15.01.87.

19. Герман Л.А., Гончаренко В.П. Современная схема продольной емкостной компенсации в системе тягового электроснабжения. Вестник РГУПС, 2013 №2.

Герман Леонид Абрамович.

Родился в 1937 году. В 1959 году окончил Московский институт инженеров транспорта (МИИТ) по специальности «Инженер путей сообщения – электромеханик». Защитил докторскую диссертацию по теме «Теория и практика совершенствования режима системы тягового электроснабжения переменного тока с установками емкостной компенсации». Доктор технических наук, профессор кафедры «Техника и технологии железнодорожного транспорта» филиала Самарского государственного университета путей сообщения в Нижнем Новгороде, член-корреспондент Российской академии транспорта. Автор более 390 научных трудов, 100 изобретений и патентов. Имеет 2 правительственные награды.

Серебряков Александр Сергеевич.

Родился в 1939 году. В 1961 году окончил Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева по специальности «Электрификация промышленных предприятий и установок». Доктор технических наук, профессор. Защитил докторскую диссертацию на тему «Методы и средства диагностики изоляции электрических машин и аппаратов их защиты». Член-корреспондент Академии электротехнических наук РФ. Удостоен знаков

«Почетному железнодорожнику» и «Лучший изобретатель железнодорожного транспорта». В настоящее время работает профессором кафедры «Электрификация и автоматизация» Нижегородского государственного инженерно-экономического университета (НГИЭУ) Автор более 400 научных работ, в том числе 10 книг-учебников и учебных пособий для вузов. Имеет более 50 авторских свидетельств СССР и патентов РФ на изобретения.

Дулепов Дмитрий Евгеньевич.

Родился в 1986 году. В 2008 году окончил Нижегородский государственный инженерно-экономический университет. Кандидат технических наук, доцент. В 2013 году защитил кандидатскую диссертацию на тему «Повышение эффективности фильтрокомпенсирующих установок в тяговой сети переменного тока». В настоящее время работает заведующим кафедрой «Электрификация и автоматизация» Нижегородского государственного инженерно-экономического университета (НГИЭУ). Оpubликовал 18 печатных работ, 1 монографию, получил 7 патентов на изобретение.

Осокин Владимир Леонидович.

Родился в 1975 году. В 1998 году окончил Нижегородскую государственную сельскохозяйственную академию. Кандидат технических наук, доцент. В 2011 году защитил кандидатскую диссертацию на тему «Повышение эффективности функционирования электрических подогревателей воды путем разработки стенда для их тестирования». В настоящее время работает доцентом кафедры «Электрификация и автоматизация» Нижегородского государственного инженерно-экономического университета (НГИЭУ). Оpubликовал 140 печатных работ, 4 монографии, получил 23 патента на изобретение.

Петров Денис Вячеславович.

Родился в 1992 году. В 2014 году окончил Московский институт инженеров транспорта (МИИТ) по специальности «Инженер путей сообщения – специалист». Соискатель. В настоящее время работает пресеил

инженером по центрам обработки данных в компании ООО «СиТри Солюшнз». Оpubликовал 3 статьи, получил 1 патент на изобретение.

German Leonid.

Born in 1937. In 1959 he graduated from the Moscow Institute of Transport Engineers (MIIT) with a degree in Railway Engineering – Electromechanics. He defended his doctoral dissertation on the topic "Theory and practice of improving the mode of the AC traction power supply system with capacitive compensation installations." Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Engineering and Technology of Railway Transport, branch of the Samara State University of Railway Transport in Nizhny Novgorod, Corresponding Member of the Russian Academy of Transport. Author of more than 390 scientific papers, 100 inventions and patents. Has 2 government awards.

Serebryakov Alexander.

Born in 1939. In 1961 he graduated from the Nizhny Novgorod State Technical University. R. E. Alekseeva, specialty "Electrification of industrial enterprises and installations." Doctor of technical sciences, professor. He defended his doctoral dissertation on the topic "Methods and tools for diagnosing the insulation of electrical machines and devices for their protection." Corresponding member of the Academy of Electrotechnical Sciences of the Russian Federation. He was awarded the badges "Honorary Railway Worker" and "Best Inventor of Railway Transport". Currently works as a professor at the Department of Electrification and Automation of the Nizhny Novgorod State Engineering and Economic University (NGIEU). Author of more than 400 scientific papers, including 10 textbooks and teaching aids for universities. He has more than 50 USSR copyright certificates and RF patents for inventions.

Dulepov Dmitry.

Born in 1986. Graduated in 2008 Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics. Candidate of Technical Sciences, Associate

Professor. In 2013, he defended his Ph.D. thesis on the topic "Improving the efficiency of filter-compensating installations in an AC traction network". Currently he works as the head of the department "Electrification and Automation" of the Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics (NGIEU). Published 18 printed works, 1 monograph, received 7 patents for invention.

Osokin Vladimir.

Born in 1975. Graduated in 1998

Nizhny Novgorod State Agricultural Academy. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. In 2011 he defended his Ph.D. thesis on the topic "Improving the efficiency of electric water heaters by developing a stand for testing them." Currently, he works as an assistant professor at the Department of Electrification and Automation at the Nizhny Novgorod State Engineering and Economic University (NGIEU). Published 140 publications, 4 monographs, received 23 patents for inventions.

Petrov Denis.

Born in 1992. In 2014, he graduated from the Moscow Institute of Transport Engineers (MIIT) with a degree in Railway Engineering – Specialist. Applicant. Currently, he works as a presale engineer for data centers in the company "CuTree Solutions" LLC. Published 3 articles, received 1 patent for an invention.

Неравномерное распределение нагрузки между выпрямительными агрегатами

// UNEVEN LOAD DISTRIBUTION BETWEEN THE RECTIFIER UNITS //

Червонченко С.С.,
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого,
г. Санкт-Петербург

Фролов В.Я., д.т.н.,
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого,
г. Санкт-Петербург

Режим работы выпрямителей в параллель является необходимым при нагрузке большой мощности, а также высокой категории надежности потребителей. Однако для успешного функционирования оборудования в данном режиме должны соблюдаться несколько важных условий, а именно: равенство выходных напряжений, номинальной мощности и числа пульсаций выпрямленного напряжения. При несоблюдении хотя бы одного из вышеприведенных условий нагрузка начинает распределяться неравномерно между выпрямительными агрегатами, что негативно сказывается на обо-

рудовании. В статье приводится математическая модель реальной электрической сети в программном комплексе MATLAB/Simulink. Получены графики распределения мощности по выпрямительным агрегатам в зависимости от входного напряжения на выпрямитель. В результате можно сделать вывод о том, что для параллельной работы необходимо выбирать оборудование с одинаковыми внутренними характеристиками не только у трансформаторов (напряжение короткого замыкания, номинальная мощность), но и у самих выпрямителей (сопротивление диодов).

Ключевые слова: выпрямительный агрегат, трансформатор, параллельное соединение, математическое моделирование, распределение нагрузки, мощность

Parallel operation of the rectifiers is necessary when the load is high power, as well as a high category of consumer reliability. However, for the successful operation of the equipment in this mode, several important conditions must be met, namely: the equality of the output voltages, the rated power and the number of ripples of the rectified voltage. If at least one of the above conditions is not met, the load begins to be distributed unevenly between the rectifier units, which negatively affects the equipment. The article presents a mathematical model of a real electrical network in the MATLAB/Simulink software package. Graphs of the power distribution over the rectifier units depending on the input voltage to the rectifier are obtained. As a result, it can be concluded that for parallel operation, it is necessary to choose equipment with the same internal characteristics not only for transformers (short-circuit voltage, rated power), but also for the rectifiers themselves (diode resistance).

Keywords: rectifier unit, transformer, parallel connection, mathematical modeling, load distribution, power

Введение

Параллельное соединение выпрямителей используется для увеличения пропускной способности и, соответственно, передаваемой мощности, повышения надежности электроснабжения оборудования, а также оптимизации входных и выходных параметров агрегатов [7,8,9,14,17].

В зависимости от поставленной задачи, требования, предъявляемые к параллельно работающим выпрямителям, различны [10,20]. При задаче повышения категории надежности электроснабжения потребителей различают два вида резервирования: полное и частич-

ное. При полном резервировании (один из двух и т.п.) обеспечивается устойчивая работа всех преобразователей, работающих на общей шине без каких-либо ограничений на распределение между ними мощности нагрузки. Такой режим может соблюдаться при условии, когда суммарная максимальная мощность потребителей не превышает максимально допустимой мощности одного выпрямителя. В таком случае при выходе из работы одного преобразователя, второй безболезненно может его заменить и заберет всю нагрузку на себя. При частичном резервировании (два из трех и т.п.) должно соблюдаться условие, при

котором распределение мощности между параллельно работающими на общей шине преобразователями не должно приводить к перегрузке одного преобразователя [5,16]. Выделяются основные условия для успешной параллельной работы выпрямителей:

1. Равенство величин выходного напряжения выпрямительных агрегатов. Несоблюдение данного условия ведет к неравномерной загрузке выпрямителей, причем всю нагрузку возьмёт на себя выпрямитель с более высоким выходным напряжением.

2. Равенство мощности выпрямительных агрегатов. При увеличении нагрузки и, соответственно, тока вы-

ходное напряжение выпрямителя снижается из-за коммутации повышенных токов. Причем, напряжение и ток уменьшатся у агрегата с меньшей мощностью, а более мощный агрегат будет работать с перегрузкой.

3. Одинаковое число пульсов выпрямленного напряжения в схемах выпрямителей. Несоблюдение данного условия приведёт к появлению уравнивающих токов, которые создают дополнительную нагрузку на сеть [2,3,4].

4. Если перед выпрямителями установлены понижающие трансформаторы, то они должны быть с одинаковым напряжением короткого замыкания. В противном случае нагрузка распределяется обратно-пропорционально величине данного параметра.

При несоблюдении вышеприведенных условий, ток между выпрямителями распределяется неравномерно, что приводит к перегреву и более быстрому выходу из строя оборудования, по которому протекает большой ток, а также недостаточному использованию вентиляторов по их предельной мощности [19].

Анализируя различные статьи, можно заметить, что авторы при исследовании неравномерной загрузки выпрямителей в качестве причин такого режима указывают в основном на параметры понижающего и преобразовательного трансформаторов, влияние мощности си-

стемы внешнего электроснабжения, тип схемы выпрямления. В редком случае акцентируется внимание на характеристиках самих выпрямителей. Видимо, подразумевается, что на параллельную работу всегда устанавливаются идентичные по параметрам агрегаты. Однако, как видно из данной статьи, в качестве примера для исследования взят реальный объект электроэнергетики, где в параллель подключены три выпрямителя с разными внутренними характеристиками. Поэтому целесообразно добавить к четырем вышеприведенным условиям еще одно, а именно равенство внутренних параметров самих выпрямительных агрегатов. При расчетах нужно обязательно учитывать все условия и аспекты, так как даже наименьшие отклонения по параметрам оказывают влияние на загрузку выпрямителей.

Данная статья основана на теоретическом исследовании параллельного режима работы высокоомощных выпрямителей, работающих по схеме полного резервирования. В этом случае основной акцент будет сделан на анализе совместного влияния конфигурации электрической сети перед выпрямителями, а также их внутренних параметров на параллельную работу. Также в исследовании представляется возможным получить зависимости распределения мощности между выпрямителями

от величины входного напряжения, что будет являться некой теоретической подосновой для существующих практических данных.

Методология исследования

В качестве объекта исследования была выбран существующий объект электроэнергетики, на котором установлены и работают параллельно три выпрямительных агрегата. Построение модели и расчеты проводились на основании актуальных электрических схем и паспортных данных установленного оборудования. Однолинейная схема электроснабжения потребителей с использованием выпрямителей представлена на рисунке 1.

Параметры оборудования, приведенного на рисунке 1, обозначены ниже.

Сетевые трансформаторы:

T-1: ТДТН-40000/110/10/6;

T-2: ТДТН-25000/110.

Токоограничивающий реактор:

P-1: РБНГ-10-1600-0,25.

Понижающие трансформаторы:

ТП-1: ТРДП-12500/10;

ТП-2: ТРДП-12500/10;

ТП-3: ТРСЗП-12500/10.

Выпрямители:

ПВ-1: В-ТПЕД-3,15к-3,3к-21;

ПВ-2: В-ТПЕД-3,15к-3,3к-21;

ПВ-3: БЛ-В-МПП-3,15к-3,3к.

Далее необходимо построить математическую модель электрической сети в программном комплексе MATLAB/Simulink, представленной на рисунке 1 [6,15]. Для этого требуется провести расчет параметров оборудования [1,11]. Параметры трансформатора определяются по нижеприведенным формулам.

Активное сопротивление первичной и вторичной обмоток трансформатора:

$$R1 = R2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_K}{S_{НОМ}}, \quad (1)$$

где P_K – потери короткого замыкания в обмотках трансформатора, кВт;

$S_{НОМ}$ – номинальная мощность силового трансформатора, кВт.

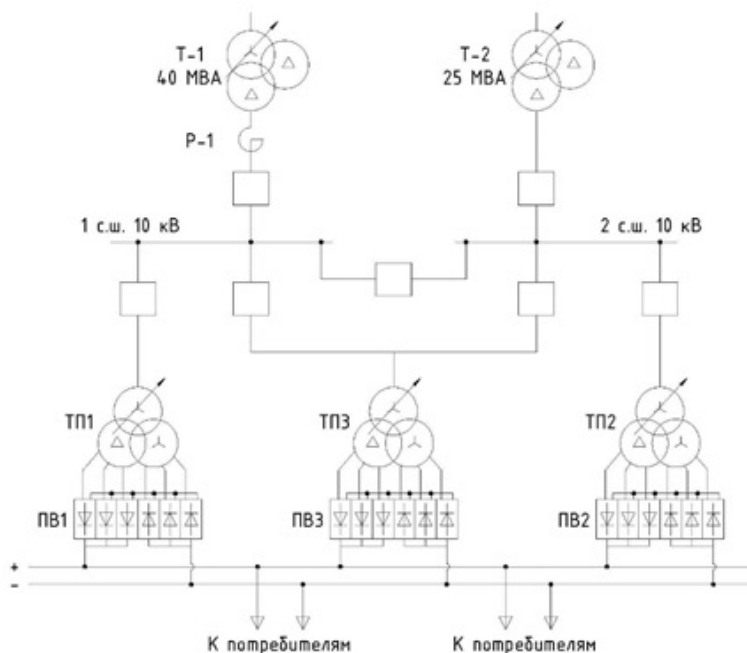


Рис. 1. Однолинейная схема электроснабжения потребителей

Индуктивность первичной и вторичной обмоток трансформатора:

$$L1 = L2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_K}{100}, \quad (2)$$

где U_K – напряжение короткого замыкания трансформатора, %.

Активное сопротивление ветви намагничивания:

$$R_m = \frac{S_{НОМ}}{P_0}, \quad (3)$$

где P_0 – потери холостого хода трансформатора, кВт.

Индуктивность ветви намагничивания:

$$L_m = \frac{100}{I_0}, \quad (4)$$

где I_0 – ток холостого хода трансформатора, %.

Параметры выпрямителей рассчитываются путем эквивалентирования схемы замещения. Данные расчеты условно не приведены, т.к. выполняются по общепринятым формулам.

Электрическая сеть задается как шины бесконечной мощности. Нагрузка моделируется блоками машин постоянного тока, общей мощностью 5700 кВт. Понижающий трансформатор ТП2 и, соответственно, выпрямитель ПВ2 в нормальном режиме получают питание от второй секции шин 10 кВ.

Для недопущения путаницы, наименование блоков в математической модели, представленной на рисунке 2, идентично наименованию блоков на однолинейной схеме электроснабжения, представленной на рисунке 1.

Анализ полученных результатов

В результате моделирования получены графики распределения мощности по выпрямителям с резкопеременной нагрузкой.

Анализируя вышеприведенные рисунки, можно сделать вывод что наилучшее распределение нагрузки между выпрямительными агрегатами наблюдается на 3 положении ПБВ ТП3 – рисунок 3. Однако, смотря на график, можно заметить, что выпрямитель ПВ3 забирает часть нагрузки у выпрямителя ПВ2. Распределение нагрузки между ними составляет 65% на 35 %. Такое негативное явление наблюдается только между выпрямителями, получающими питание от одной секции шин 10 кВ (в данном случае от второй).

На рисунке 4 видно, что при переводе на одну ступень ПБВ ТП3, что соответствует снижению напряжения на выходе выпрямителя на 35 В, резко меняется распределение мощности между выпрямителями, получающими питание от одной секции шин 10 кВ. В данном случае выпрямитель ПВ3 берет нагрузку в 3-4 раза меньшую, чем ПВ2. Соответственно распределение мощности между агрегатами составляет примерно 75 % на 25%.

Анализируя рисунок 5 видно, что при переводе на еще одну ступень ПБВ ТП3, а это значит еще меньшее выходное напряжение (-100 В), выпрямитель ПВ3 вообще не берет нагрузку, которая переходит полностью на работающий в параллель ПВ2.

Однако, если посмотреть паспортные данные оборудования, то можно увидеть, что у понижающего трансформатора ТП3 паспортное

значение напряжения короткого замыкания $U_K = 8,57 \%$, а у ТП1 и ТП2 равняется 7,31 % и 7,33 % соответственно. Из теории следует, что данный параметр оказывает непосредственное влияние на изменение вторичного напряжения трансформатора при нагрузках, определяет значения ударного и установившегося тока короткого замыкания при номинальном напряжении, а также распределение нагрузки между параллельно работающими трансформаторами [12]. Причем распределение нагрузки происходит обратно-пропорционально значению величины напряжения короткого замыкания. Данному явлению можно дать два объяснения:

1. неодинаковые характеристики (номинальная мощность, напряжение короткого замыкания, внутренние сопротивления) двух сетевых трансформаторов, причем после Т-1

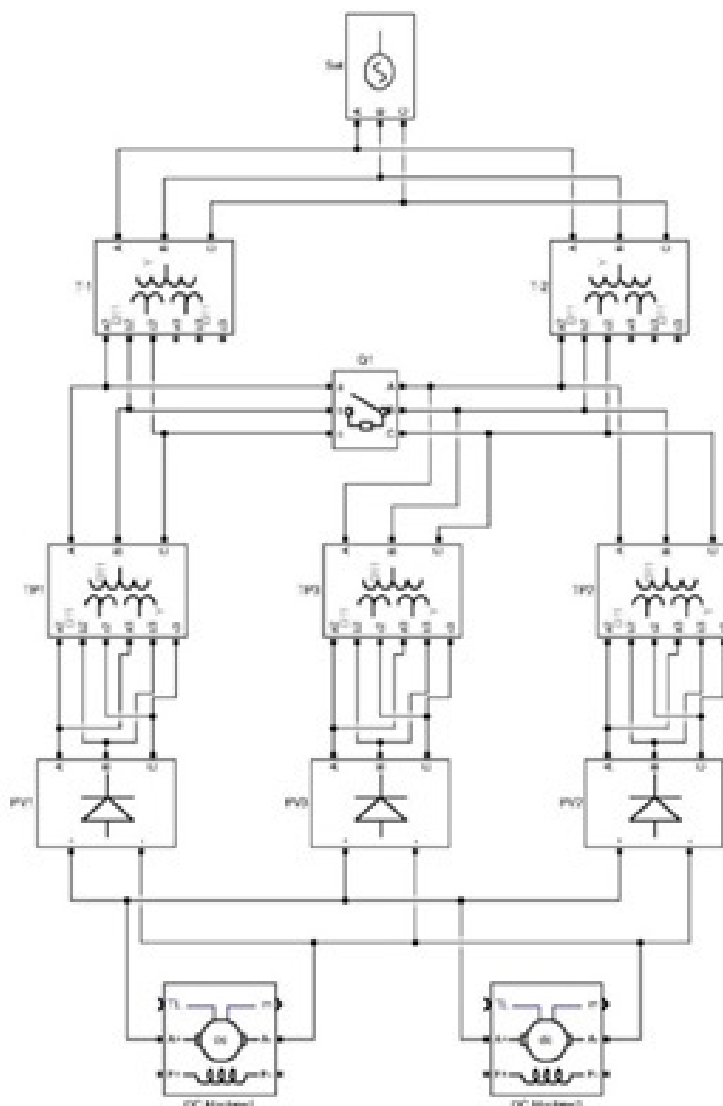


Рис. 2. Математическая модель схемы электроснабжения потребителей

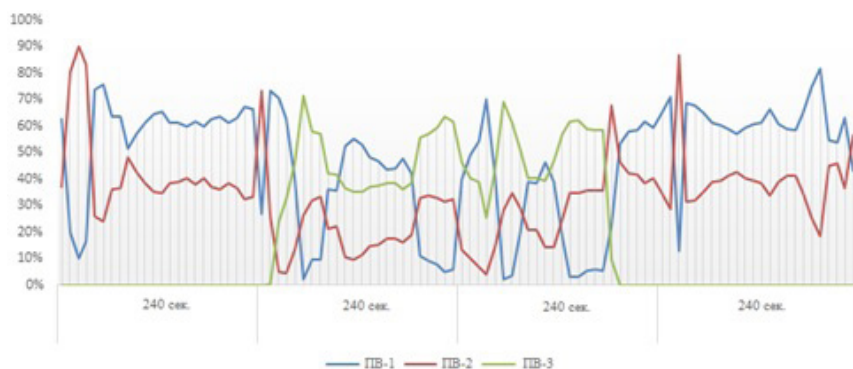


Рис. 3. Распределение нагрузки между выпрямителями. ПВ ТПЗ в положении (номинальное положение)

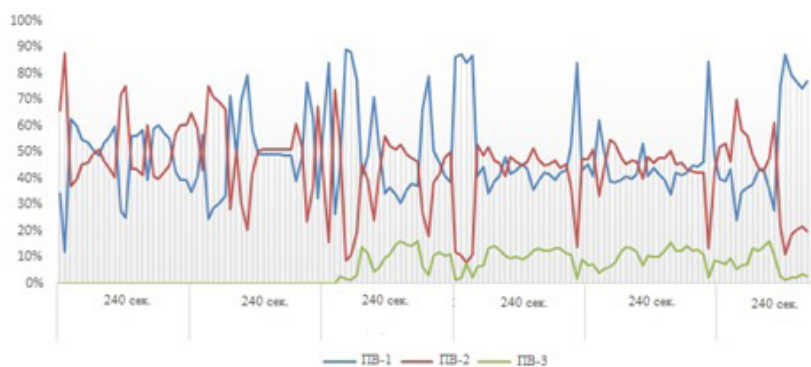


Рис. 4. Распределение нагрузки между выпрямителями. ПВ ТПЗ в 4 положении (+1%)

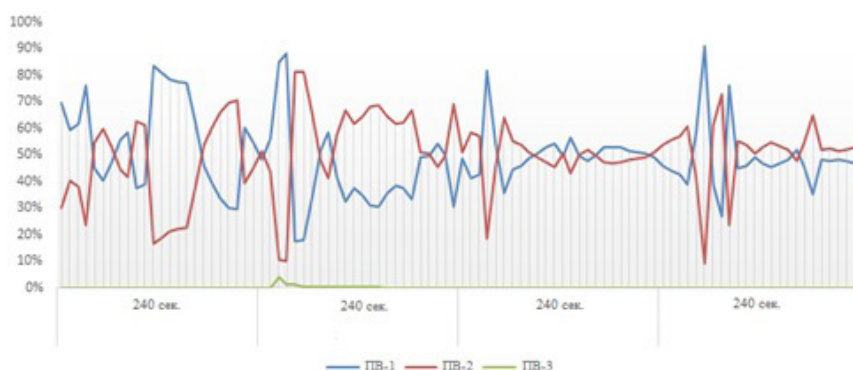


Рис. 5. Распределение нагрузки между выпрямителями. ПВ ТПЗ в 5 положении (+3%)

установлен еще и токоограничивающий реактор. Все вместе это создает неравномерную загрузку сетевых трансформаторов, дополнительные потери и, соответственно, негативное влияние на распределение мощности «снизу», по стороне 10 кВ и между выпрямителями [13].

2. неодинаковые характеристики (количество диодов, внутреннее сопротивление) выпрямителей. Причем у новых выпрямителей сопротивление диодов, как правило, меньше.

При неравенстве тока параллельно работающим выпрямителям, между ними возникает «паразитный» уравнительный ток, который создает

дополнительное падение напряжения в агрегате с меньшим током [18].

Заключение

В результате теоретического исследования математической модели электрической сети доказано, что, в отличие от ранее сделанных работ в данной области, для успешного функционирования выпрямителей в параллель на общую нагрузку необходимо обращать внимание на параметры не только понижающих трансформаторов, но и самих выпрямителей, у которых могут отличаться внутренние сопротивления диодов. При работе

выпрямительных агрегатов разных конструкций с разными параметрами в параллель, распределение нагрузки между ними происходит не лучшим образом. Опытным путем получены зависимости, которые отражают взаимосвязь между распределением нагрузки высокоомощных выпрямителей и положением РПН на понижающем трансформаторе. Так, из статьи можно получить количественную зависимость, что при изменении напряжения на высокоомощном выпрямителе на 1 В неравномерное распределение тока (нагрузки) между ними составляет ~5 А.

Касательно распределения нагрузки между выпрямителями, то в опытах лучший режим был при соотношении нагрузки 65% к 35%. На такой режим работы основное влияние оказывает, как доказано выше, такой фактор как питание выпрямительных агрегатов от разных секций шин, в свою очередь получающих питание от разных сетевых трансформаторов с различными характеристиками, также вносит негативное влияние в распределение нагрузки.

Результаты данного исследования особенно актуальны для отраслей промышленности, где присутствует длительная нагрузка с резкопеременным характером, а именно горнодобывающая, транспортная и т.п.

Литература

1. Степанов А.А. К методам расчета установленных мощностей выпрямительных трансформаторов / А.А. Степанов, О.Л. Волкова, Н.И. Щуров // Научный вестник НГТУ. 2010. Вып. 4 (41). С.155-160.
2. Степанов А.А. Энергоэффективность двадцатичетырехпульсового выпрямителя в системе распределенного электроснабжения постоянного тока при использовании кольцевых схем выпрямления / А.А. Степанов, Н.И. Щуров // Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука технологии инновации»: в 7-и частях. Часть. 5. 2013. С.380–383.
3. Степанов А.А. Двадцатичетырехпульсный выпрямитель в системе распределенного электроснабжения постоянного тока с улучшенной электромагнитной со-

вместимостью / А.А. Степанов, Н.И. Щуров // Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука технологии инновации»: в 7-и частях. Часть. 5.2012. С.380–383.

4. Патент №151148 РФ. Преобразователь с 24-кратной частотой пульсации переменного напряжения в постоянное / А.А. Степанов, Н.И. Щуров, В.И. Сопов, М.М. Джаборов, Е.А. Степанова, К.С. Волкова. Оpubл.20.03.2015. Бюл. №8.

5. Экспериментальные исследования режимов работы многопульсных выпрямителей / М.Е. Вильбергер, О.Л. Волкова, Е.В. Олейникова, А.А. Степанов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока: Научный журнал. 2010. №1. С.323–325.

6. Дьяконов В.П. MATLAB. Полный самоучитель. М.: ДМК Пресс, 2012. 768 с.

7. Евдокимов, С.А. Структурный синтез многофазных вентильных преобразователей / С.А. Евдокимов, Н.И. Щуров. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. 423 с.

8. Патент № 2373628 РФ. Преобразователь переменного напряжения в постоянное / С.А. Евдокимов. Оpubл.20.11.2009 Бюл. № 32.

9. Выпрямители для систем распределенного электроснабжения железных дорог постоянным током / С.А. Евдокимов, Н.И. Щуров, С.В. Мятёж, М.М. Джаборов, А.А. Степанов // Сборник научных трудов НГТУ. 2012. Вып. №2 (68). С.117 – 124.

10. Комяков А.А. Оценка эффективности параллельной работы выпрямительных преобразователей тяговых подстанций на основе данных измерительных систем / А.А. Комяков, В.В. Эрбес, В.Л. Незевак // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. Вып.2 (46). С.137-143.

11. Новаш И.В. Расчет параметров модели трехфазного трансформатора из библиотеки matlab-simulink с учетом насыщения магнитопровода / И.В. Новаш, Ю.В. Румянцев // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. 2015. Вып. № 1. С.12 – 24.

12. Проскураков В.С. Электротехника: Трансформатор. Учебное пособие / В.С. Проскураков, С.В. Соболев, Н.В. Хрулькова. Екатеринбург. 2007. 29 с.

13. Токораспределение в тяговых сетях при различных напряжениях источников питания / Д.М. Стрельникова, В.И. Сопов, О.С. Мармулева, Е.А. Сухарева, А.А. Степанов // Сборник научных трудов «Фундаментальные и прикладные исследования».2016. С.161-163.

14. Силовая полупроводниковая элементная база. Технология производства. Конструктивные решения: Учебное пособие / В.Я. Фролов, А.М. Сурма, К.Н. Васерина, А.А. Черников. СПб.: Издательство «Лань», 2019. 228 с.

15. Фролов В.Я. Устройства силовой электроники и преобразовательной техники с разомкнутыми и замкнутыми системами управления в среде MATLAB-SIMULINK. Учебное пособие. / В.Я. Фролов, В.В. Смородинов. СПб.: Издательство «Лань», 2017. 332 с.

16. Фролов В.Я. Источники питания. Учебное пособие. / В.Я. Фролов, В.В. Смородинов. СПб.: Издательство Полит. ун-та, 2008. 160 с.

17. Improving the energy efficiency of three-phase voltage converters using the Steiner method / Evdokimov, S.A., Shchurov, N.I., Volkova, O.L., Stepanov, A.A. // Russian Electrical Engineering. 2011. № 82(6). P. 281-287.

18. Petrov A. A. Comparative analysis of measures to improve the quality of electricity in metro / A. A. Petrov, N. I. Schurov // IEEE Computer Society. 2018. P.690-693. DOI: 10.1109/EDM.2018.8434947.

19. Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control Operation of Nonisolated DC-DC Converters / Pazouki E., Sozer Y., De Abreu-Garcia J.A. // IEEE Transactions on Industry Applications. 2018. №54(1). P. 310-320.

20. Paralleling power supplies: Many viable options, but know the tradeoffs // URL: <https://www.edn.com/paralleling-power-supplies-many-viable-options-but-know-the-tradeoffs> (дата обращения 17.04.2022).

Червонченко Сергей Сергеевич.

Родился в 1995 году. Выпускник Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого по специальности «электроснабжение». С 2017 года занимается проектированием энергетических систем и управлением проектами по строительству объектов электроэнергетики. В настоящее время работает

инженером-исследователем Лаборатории электрических аппаратов Высшей школы электроэнергетических систем Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Автор 2 патентов, 13 опубликованных статей.

Фролов Владимир Яковлевич.

Родился в 1950 году. Выпускник Ленинградского политехнического института им. М.И.Калинина, специальность – «электрические аппараты». Доктор технических наук. Защищал диссертацию по теме «Основы теории эффективной электродуго-контактной обработки металлов». Более 40 лет работает в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого, ранее Заведующий кафедры Электротехники и электроэнергетики. За последние 3 года получил 5 патентов и свидетельств. Изобретатель СССР, Почетный работник высшего образования, действительный член академии Электротехнических наук РФ.

Chervonchenko Sergey.

Born in 1995. Graduate of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University with a degree in power supply. Since 2017, he has been designing energy systems and managing projects for the construction of electric power facilities. Currently works as a research engineer at the Laboratory of Electrical Apparatuses of the Higher School of Electric Power Systems of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Author of 2 patents, 13 published articles.

Frolov Vladimir.

Born in 1950. Graduate of the Leningrad Polytechnic Institute. M.I.Kalinina, specialty – "electrical devices". Doctor of Technical Sciences. He defended his dissertation on the topic "Fundamentals of the theory of effective electric arc contact processing of metals." For more than 40 years he has been working at Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, previously Head of the Department of Electrical Engineering and Power Engineering. Over the past 3 years received 5 patents and certificates. Inventor of the USSR, Honorary Worker of Higher Education, full member of the Academy of Electrical Sciences of the Russian Federation.

Разработка обобщенной графоаналитической модели подсистемы мониторинга и управления системой электроснабжения метрополитена

// DEVELOPMENT OF A GENERALIZED GRAPHIC-ANALYTICAL MODEL OF THE SUBSYSTEM FOR MONITORING AND CONTROLLING THE ELECTRICITY SUPPLY SYSTEM OF THE SUBWAY //

**Канаев А.К., д.т.н., профессор,
Петербургский государственный
университет путей сообщения
Императора Александра I,
г. Санкт-Петербург**

**Давыдова А.В.,
Петербургский государственный
университет путей сообщения
Императора Александра I,
г. Санкт-Петербург**

Необходимость разработки обобщенной графоаналитической модели обусловлена отсутствием функциональных возможностей существующих подсистемы мониторинга и управления метрополитена к анализу процесса функционирования системы электроснабжения как

обоснования проведения структурной оптимизации работы объекта. Примененный метод производящих функций и теория графов определяют соотношения по вероятности восстановления, времени восстановления и необходимому объему средств диагностирования, являющиеся важными для обоснования оценки степени достижения требований, что дает возможность сделать коррекцию решения о модернизации объекта в условиях заданных требований и ограничений.

Ключевые слова: система мониторинга, граф, производящая функция, вероятность восстановления, электроснабжение.

The need to develop a generalized graphic-analytical model is due

to the lack of functionality of the existing subsystem for monitoring and controlling the electricity supply system of the subway to analyze the process of functioning of the power supply system as a justification for structural optimization. The applied method of generating functions and graph theory determine the ratios for the probability of recovery, recovery time and the required amount of diagnostic tools, which are important for substantiating the assessment of the degree of achievement of the requirements, which makes it possible to make a correction under the conditions of specified requirements and restrictions.

Keywords: monitoring system, graph, generating function, recovery probability, electricity supply.

Введение

Длительный период внедрения новых технологий на электротехнические комплексы увеличивает разрыв в проведении цифровизации производств. Сложность возрастает за счет уникальности, разработки индивидуальных проектных решений с учетом режима работы данных комплексов. Одними из самых важных этапов являются решение о необходимости модернизации и проведение предпроектных работ, которые включают в себя техническое обоснование, проведение качественного анализа объекта, сравнение показателей систем традиционного исполнения и современных на данный момент, определение и подтверждение природы возникновения нарушений, разработку предложений по нормализации параметров и оптимизации ра-

боты в целом. Данные требования выдвигаются ГУП «Петербургским метрополитеном» в техническом задании в рамках работы по проекту Единого диспетчерского центра метро, как одного из важных элементов глобальной интеллектуальной системы управления городским хозяйством Smart-city [1]. Соответственно, можно сказать, что существующие в метрополитене подсистемы мониторинга и управления имеют недостаточный функциональный ресурс для проведения указанных ранее работ.

Поэтому необходима разработка модели, позволяющей сформировать обоснованное соотношение требований для определения оптимального пути модернизации объекта, оценки степени достижения требований, а также способствующая сокращению времени на

проведение предпроектных работ. Предлагается одним из компонентов этой модели заложить графоаналитическую модель с применением теории графов и метода производящих функций.

Постановка задачи

Достижение поставленной цели требует решения следующих задач: охарактеризовать системы электроснабжения метрополитена и существующие подсистемы мониторинга и управления, сформировать перечень состояний, определить структурные взаимосвязи состояний, построить граф состояний, провести расчет на основе метода производящих функций, построить зависимости вероятности восстановления от времени, объема средств диагностирования и ошибок 1 и 2 рода.

Характеристика системы электроснабжения и существующих подсистем мониторинга и управления

Система электроснабжения питает потребителей разного уровня напряжения: 825 В – подвижной состав, 380 В – эскалаторы, вентиляционные и насосные установки, ремонтные и уборочные машины, 220 В – осветительные нагрузки, электроинструмент и др. Совмещенная тягово-понижительная подстанция (СТП) включает в себя оборудование для подключения, передачи, преобразования и распределения электроэнергии: высоковольтные выключатели, понижительные трансформаторы, выпрямители, автоматы, разъединители и др. [2].

Данное оборудование контролируют следующие подсистемы мониторинга и управления: комплексная автоматизированная система диспетчерского управления работой линии метрополитена, комплекс регистрации технологических нарушений, автоматизированная информационно-измерительная система коммерческого учета электроэнергии, автоматизированная информационно-измерительная система технического учета энергоресурсов и воды. Подсистемы имеют трехуровневую структуру: нижний уровень – измерительные устройства, средний уровень – устройства преобразования интерфейса, контроллеры, оптический кросс и др., верхний уровень – информационно-вычислительный комплекс по формированию отчетности. К контролируемым параметрам в общем случае относятся: аналоговые – токи, напряжения, мощности, частота; дискретные – положение выключателей, срабатывание защит, сигналы перегрузки и др. А отчетность представлена построением графиков токов и напряжений по заданному периоду, векторными диаграммами и других отчетов, обусловленных оперативной работой.

Проведенный анализ существующих подсистем мониторинга и управления показывает большой охват оборудования в пределах подстанций, отсутствие прямого взаимодействия друг с другом, а также с крупными потребителями. Они архивируют большой объем информа-

ции о состоянии оборудования, но перечень методов по анализу и работе с данными ограничен. Поэтому предлагается рассмотреть вариант по расширению вычислительного ресурса подсистем мониторинга и управления посредством построения обобщенной графоаналитической модели.

Построение обобщенной графоаналитической модели

Согласно теории графов, граф будет задан графическим способом и представлен конечным, ориентированным и связным [3]. При построении графа будут рассмотрены вершины как конечное множество состояний системы, связи как процесс перехода из одного состояния в другое с соответствующими вероятностями. Путь задан последовательностью связей, которая не содержит повторений этих связей, а контур задан как путь, начальная и конечная вершины которого совпадают.

Перечень состояний сформирован на основе типовых этапов процесса функционирования и восстановления системы электроснабжения и выделены в следующих состояниях: S1 – исправное состояние; S2 – состояние проведения измерений; S3 – состояние параметрического отказа; S4 – состояние нарушения условий эксплуатации; S5 – состояние неисправности обо-

рудования и коммутационных аппаратов; S6 – состояние неисправности кабельной продукции; S7.1 – состояние восстановления физических отказов; S7.2 – состояние восстановления параметрических отказов. Переходы из одного состояния в другой обусловлены обобщенными связями состояний на основе процесса работы системы передачи данных.

Принимаются следующие допущения на начало моделирования: подсистема мониторинга и управления работоспособная, вероятности переходов постоянные, время нахождения в состоянии как постоянное и не зависит от того, каким образом объект перешёл в данное состояние. Так же стоит отметить наличие сопроводительных операций в процессе мониторинга, а именно наличие ошибок – определении исправного состояния как отказ и определении неисправного состояния как исправное.

Данные ошибки будут учтены в обобщенной графоаналитической модели как ошибки 1-го и 2-го рода соответственно. Полученный обобщенный граф представлен на рис.1.

Расчет с применением метода производящих функций

Каждому переходу из состояния в состояние соответствует переходная (производящая) функция вида [4]:

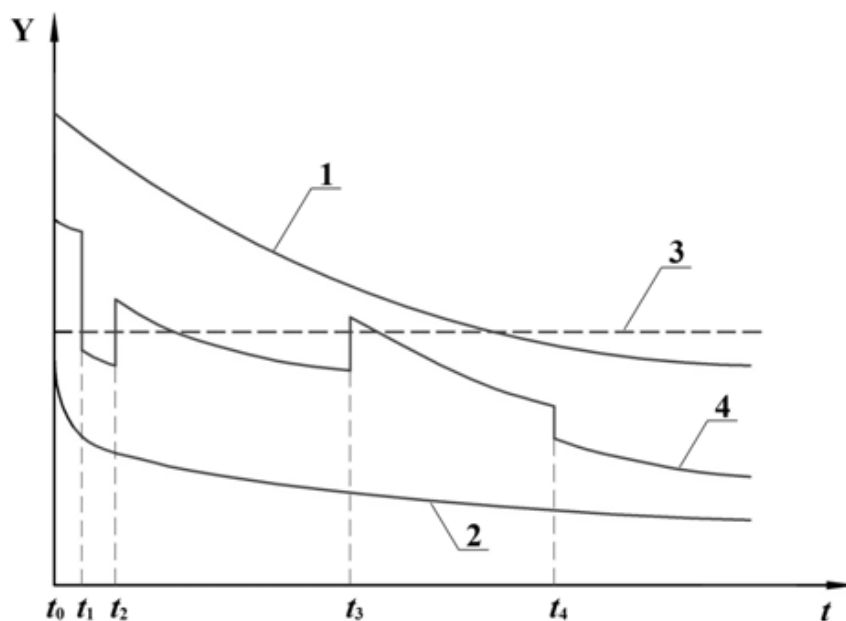


Рис.1. Обобщенная графоаналитическая модель процесса функционирования и восстановления электротехнического комплекса

$$F(x) = \sum_{i=1}^n p_i * x^a, (1)$$

где x – параметр, определяющий объем средств диагностирования ($x = [0, 1]$);

$a = t$ – безразмерная величина, характеризующая количество единичных отрезков времени;

p_i – вероятность i -го перехода.

Производящая функция системы имеет вид:

$$F_{i[S1 \rightarrow S1]}(x) = \frac{\{(f_1^p + \dots + f_n^p) * (1 - f_1^k) * \dots * (1 - f_m^k)\}}{(1 - f_1^k) * \dots * (1 - f_m^k)}, (2)$$

где f_n^p – производящая функция n -го пути обобщенного графа;

f_m^k – производящая функция m -го контура обобщенного графа.

Построение зависимостей

Представленные на рис. 2, 3 зависимости вероятности восстановления от времени диагностирования отражают временной аспект процесса восстановления. Модель определит время наступления полного восстановления, что позволяет скорректировать ожидаемые требования. При этом важную роль в системе играет восстановительные свойства состояний и заданный объем средств диагностирования, снижение доли которых значительно увеличивает время восстановления всей системы, что недопустимо.

На рис. 4 – 7 представлены зависимости вероятности восстановления от вероятности возникновения ошибки первого и второго рода. Ошибка первого рода представлена определением исправного состояния как отказ в следствии неточности средств измерительной системы, человеческого фактора при проектировании и выборе средств измерения. Увеличение данной ошибки влечет за собой резкое снижение вероятности восстановления системы в целом, а также проведение дополнительных контрольных проверок и переключений, в крайнем случае – остановку работы блока системы. А ошибка второго рода представлена определением неисправного состояния как исправное аналогично ошибке первого рода. Ее увеличение влечет за собой снижение вероятности восстановления системы в целом. Особенно негативное влияние выражается в накопительном эффекте, потери времени на поиск неисправности, появлении новых отказов.

На рис. 8 представлена зависимость вероятности восстановления системы от объема средств диагностирования. Под объемом средств диагностирования определено не столько количество диагностических приборов, сколько объем их измерительного ресурса. Данный параметр может быть представлен «ограничивающим» в части финансирования

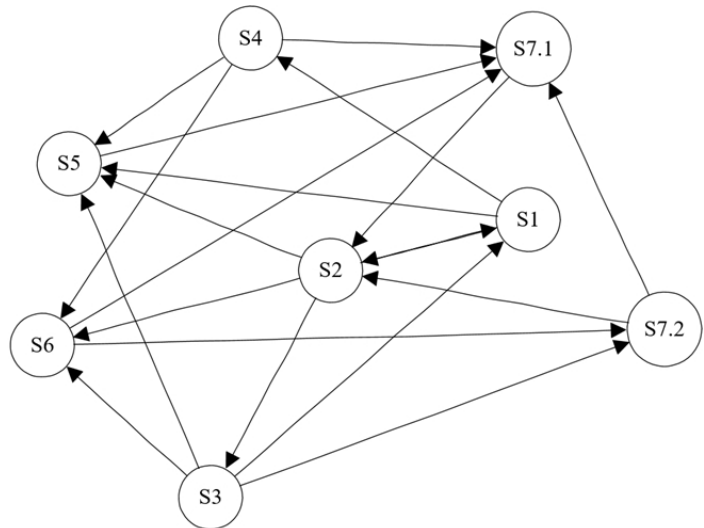


Рис. 2. Зависимость вероятности восстановления системы от времени диагностирования элементов системы в состоянии отказа $F(a)$

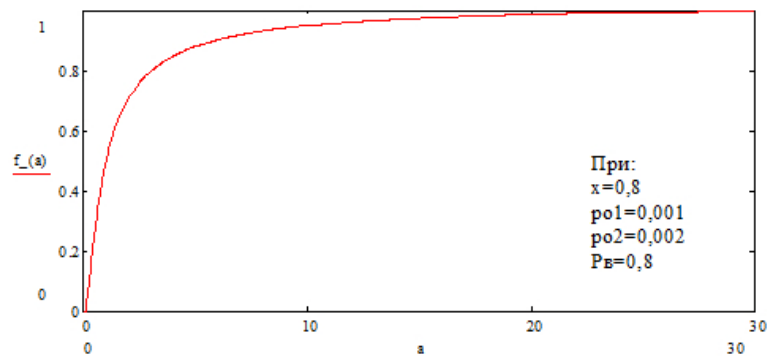


Рис. 3. Зависимость вероятности восстановления системы от времени диагностирования элементов системы в состоянии отказа $F(a)$

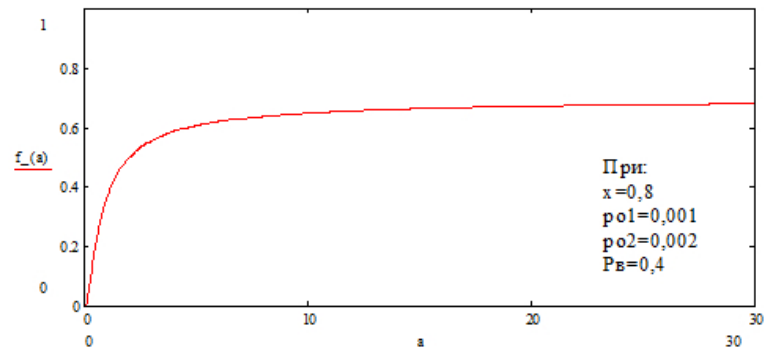


Рис. 4. Зависимость вероятности восстановления системы от вероятности возникновения ошибки первого рода $F(po1)$

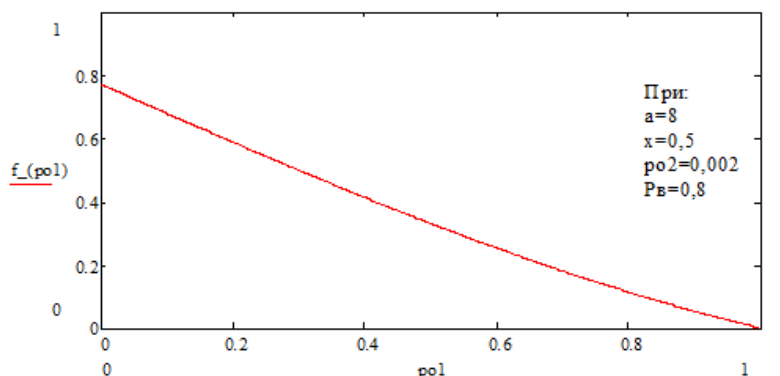


Рис. 5. Зависимость вероятности восстановления системы от вероятности возникновения ошибки первого рода $F(po1)$

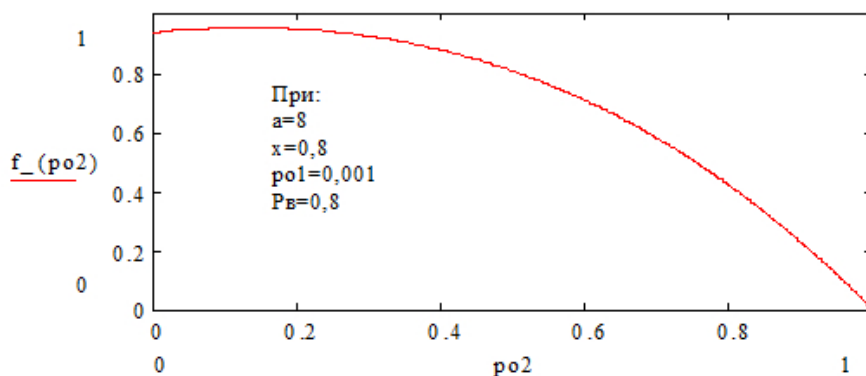


Рис. 6. Зависимость вероятности восстановления системы от вероятности возникновения ошибки второго рода $F(po2)$

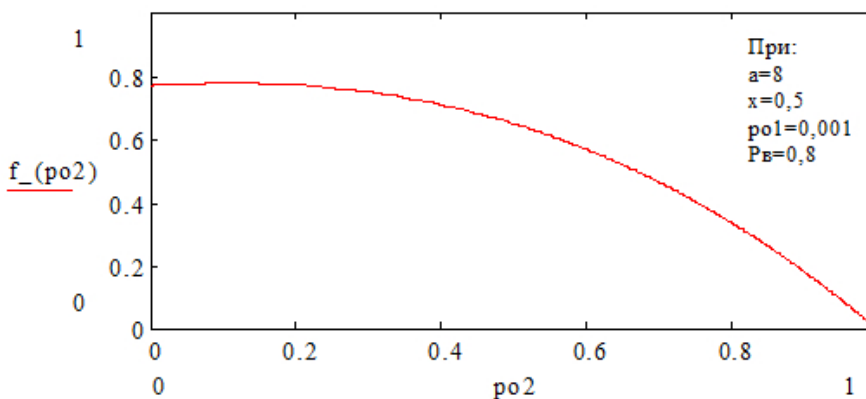


Рис. 7. Зависимость вероятности восстановления системы от вероятности возникновения ошибки второго рода $F(po2)$

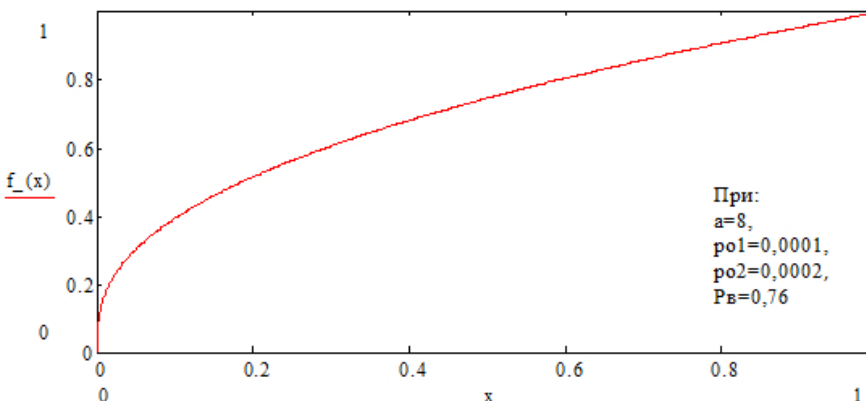


Рис. 8. Зависимость вероятности восстановления системы от объема средств диагностирования $F(x)$

электроснабжения в целом, находящейся в состоянии отказа, приводит к возрастанию вероятности восстановления. В данном случае обслуживающий персонал имеет больше возможностей на приведение оборудования в готовность.

2. Предъявление высоких требований к параметрам метрологических ресурсов (снижение вероятностей возникновения ошибок первого и второго рода) приводит к возрастанию вероятности восстановления системы электроснабжения вследствие получения обслуживающим персоналом более точной и оперативной информации о состоянии оборудования.

3. Оснащение объекта большим объемом средств диагностирования приводит к увеличению вероятности восстановления его работы за время, не превышающее заданное, при фиксированных значениях вероятностей возникновения ошибок первого и второго рода. При этом обслуживающий персонал получает достаточное количество необходимой информации для принятия своевременных решений по обслуживанию.

4. Использование более совершенных методик, моделей и алгоритмов обработки поступающей диагностической информации повышает вероятность восстановления рассматриваемой системы.

Таким образом, обобщенная графоаналитическая модель процессов функционирования и восстановления позволяет обобщить представления о структуре работы подсистемы мониторинга и управления и самой системы электроснабжения метрополитена в одном моделировании, а также имеет возможность для построения более сложных структурных форм и взаимозависимостей на основании эксплуатационных ситуаций.

Литература

1. Вице-губернатор Игорь Албин ознакомился с работой диспетчерского аппарата метрополитена URL: <http://www.metro.spb.ru/news/item/id/387>. Дата обращения: 01.06.2022.
2. Быков Е. И. Электроснабжение метрополитенов. Устройство, эксплуатация и проектирование. М.: Транспорт, 1977. – 431 с.

(стоимость более функционального прибора) или надежности (увеличение количества приборов с низким измерительным ресурсом).

Выводы

Разработанная обобщенная графоаналитическая модель дает возможность выявить соотношения вероятности восстановления рассматриваемого объекта, времени восстановления, объема средств диагностирования для прямого моделирования в процессе проектиро-

вания или модернизации структуры объекта с учетом имеющихся ресурсов. Это позволит провести оценку степени достижения требований, а также сократить время на проведение предпроектных работ за счет моделирования и построения структуры подсистемы один раз при проведении моделировании.

Построение зависимостей показывают:

1. Предъявление более мягких требований по времени восстановления оборудования или системы

3. Уилсон Р. Дж. Введение в теорию графов, 5-е изд.: Пер. с англ. СПб.: Диалектика, 2019. – 240 с.

4. Гнеденко Б. В. Курс теории вероятностей: Учебник. Изд. 8-е, испр. и доп. Б.В. Гнеденко. М.: Едиториал УРСС, 2005. – 448 с.

Канаев Андрей Константинович.

Родился в 1976 году. Окончил Петербургский государственный университет путей сообщения по специальности "автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте". Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук на тему «Обеспечение информационного обмена системы управления перевозками на основе перспективных телекоммуникационных сетей» в 2001 году. Защита диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук проводилась в закрытом диссертационном совете по оборонным проблемам в 2007 году. Профессор, доктор технических наук. Общий стаж работы 22 года. В настоящее время работает профессором кафедры «Электрическая связь» ПГУПС. Заместитель главного редактора журнала "Известия Петербургского университета путей сообщения Императора Александра I" (в перечне ВАК). Член редколлегии

журнала «Бюллетень результатов научных исследований» (в перечне ВАК). Член редакционного совета журнала «Труды учебных заведений связи» (в перечне ВАК). Член редколлегии журнала «Интеллектуальные технологии на транспорте». Автор 99 статей, 3 монографий, 10 авторских свидетельств и патентов на изобретения, 2 государственных стандарта, 163 тезисов докладов и выступлений на конференциях.

Давыдова Анастасия Валентиновна.

Родилась в 1995 году. Окончила Петербургский государственный университет путей сообщения по специальности "подвижной состав железных дорог". Аспирант кафедры «Электрическая тяга» Петербургского государственного университета путей сообщения.

Kanaev Andrey.

Born in 1976. He graduated from St. Petersburg State University of Railways with a degree in automation, telemechanics and communications in railway transport. He defended the dissertation for the degree of candidate of technical sciences on the topic "Ensuring the information exchange of the transportation system based on promising telecommunication networks" in 2001.

The defense of the dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences was carried out in a closed dissertation council for defense problems in 2007. Professor, Doctor of Technical Sciences. Total work experience 22 years. Currently, he works as a professor at the Department of Electrical Communications at PGUPS. Deputy editor -in -chief of the magazine "Izvestia of St. Petersburg University of Railways of Emperor Alexander I" (in the VAK list). Member of the editorial board of the journal "Bulletin of the Results of Scientific Research" (in the List of the Higher Attestation Commission). Member of the editorial council of the journal "Transactions of educational institutions" (in the List of the Higher Attestation Commission). Member of the editorial board of the journal "Intelligent Technologies in Transport". The author of 99 articles, 3 monographs, 10 copyright certificates and patents for inventions, 2 state standard, 163 abstracts and speeches at conferences.

Davydova Anastasia Valentinovna

Born in 1995. Graduated from St. Petersburg State University of Communications with a degree in railway rolling stock. Post-graduate student of the department "Electric traction" of the St. Petersburg State University of Communications.

Степень работоспособности выпрямителя автомобильного генератора

// STATE OF FUNCTION OF THE THREE-PHASE RECTIFIER OF AN AUTOMOBILE ALTERNATOR //

**Пузаков А.В., к.т.н.,
Оренбургский государственный
университет,
г. Оренбург**

Одной из основных причин выхода из строя автомобильных генераторов являются неисправности диодов выпрямительного блока. Актуальной является задача определения технического состояния автомобильного генератора (включая выпрямитель) на основе бортового мониторинга параметров выходного напряжения. Аналитически напряжение выпрямителя при обрыве одного или нескольких диодов представлено в виде суммы слагаемых, соответствующих временным отрезкам работы выпрямителя. Представлена методика моделирования обрыва диодов трехфазного мостового выпрямителя. Экспериментально подтверждено, что выходное напряжение выпрямителя определяется

количеством задействованных диодов. Предложено вычислять степень функционирования выпрямителя как отношение текущего значения напряжения к напряжению исправного выпрямителя при одном значении тока. Обобщенная модель напряжения трехфазного выпрямителя будет использована при разработке измерительного комплекса бортового мониторинга системы электрооборудования автомобилей.

Ключевые слова: автомобильный генератор, трехфазный выпрямитель, обрыв диодов, моделирование неисправностей, степень работоспособности.

One of the main causes of failure of automotive alternators are diodes faults in the rectifier unit. Relevant is the task of determining the technical condition of the vehicle alternator

(including the rectifier) based on the on-board monitoring of output voltage parameters. Analytically rectifier voltage at open circuit of one or several diodes is represented as a sum of terms, corresponding to the time intervals of rectifier operation. A technique for modeling diode open circuit of a three-phase bridge rectifier is presented. It is experimentally proved that output voltage of the rectifier is determined by the number of diodes involved. It is proposed to calculate the rectifier's degree of functioning as the ratio of the current voltage value to the voltage of the rectifier in good condition at the same current value. Generalized model of three-phase rectifier voltage will be used for development of measuring complex of onboard monitoring of vehicle power supply system.

Keywords: Automotive alternator, Three-phase rectifier, Diode open circuit, Fault modeling, State of Function.

Согласно проведенным ранее исследованиям [1, 2, 3, 4, 5] неисправности выпрямителей автомобильных генераторов относятся к числу наиболее распространенных. На их долю приходится от 12% до 30% от общего числа неисправностей генераторов. Проявляются неисправности диодов либо увеличением сопротивления внутренней цепи (обрыв), либо снижением сопротивления цепи (замыкание). Возникновение замыкания даже одного из диодов чрезвычайно негативно сказывается на работе генератора (увеличение шума, температуры) и легко диагностируется. Обрыв цепи одного из диодов приводит к недозаряду батареи и не обнаруживается простыми диагностическими средствами. Обрыв цепи ряда диодов ведет к

полному прекращению работы генератора и значительному снижению напряжения бортовой сети. В статье рассматривается влияние полного и частичного обрыва цепи одного и нескольких диодов выпрямителя на величину выходного напряжения автомобильного генератора.

Выпрямительное устройство содержит не один, а несколько диодов, включаемых между собой последовательно и/или параллельно. Выпрямительный блок автомобильного генератора может содержать от шести до двенадцати диодов и более.

Трехфазный мостовой выпрямитель представляет собой шесть диодов, сгруппированных по два, включенных согласно последовательно. Напряжение на выходе та-

кого выпрямителя U_d описывается выражением (1)

$$U_d = U_2 - \sum U_0 - I_d \cdot \sum r_d \quad (1)$$

где U_d – напряжение на выходе выпрямителя, В; U_2 – переменное напряжение на входе выпрямителя, В; U_0 – пороговое напряжение одного диода, В; I_d – ток выпрямителя, А; r_d – омическое сопротивление одного диода в прямом направлении, Ом.

Аналитически напряжение трехфазного выпрямителя можно представить в виде суммы слагаемых, соответствующих временным отрезкам работы выпрямителя (таблица 1). Каждый временной отрезок характеризуется своим значением действующего линейного напряжения [6, 7, 8]. Падение напряжения на диоде

определяется пороговым напряжением ΔU и потерями на собственном омическом сопротивлении диода. Первая составляющая зависит от числа вновь включаемых диодов на каждом отрезке времени. Омические потери на диоде зависят от доли протекающего через диод тока.

Рассмотрим случаи одновременного обрыва двух диодов трехфазного выпрямителя. Возможны три варианта данной ситуации: обрыв одного из положительных и одного из отрицательных диодов, связанных с разными фазами генератора (таблица 1, третья строка); обрыв двух диодов, подключенных к одной

фазе генератора (таблица 1, пятая строка) и обрыв двух положительных/отрицательных диодов, подключенных к разным фазам генератора (таблица 1, четвертая строка).

Рассмотрим случаи одновременного обрыва трех диодов трехфазного выпрямителя. Возможны три варианта данной ситуации: обрыв диодов в шахматном порядке (например, положительного в фазе *a*, и двух отрицательных в фазах *b* и *c*); обрыв трех диодов положительной/отрицательной полярности, а также обрыв двух диодов, подключенных к одной фазе генератора и одного из диодов в другой фазе (таблица 1, шестая строка).

Таблица 1. Форма и величина выходного напряжения трехфазного выпрямителя при моделировании обрыва диодов

Схема выпрямителя	Форма выходного напряжения выпрямителя	Аналитическое выражение напряжения выпрямителя
		$U_d^1 = \frac{\sqrt{2}}{2\pi} \cdot U_2 - \Delta U - \frac{r_d}{2} \cdot \frac{I_d}{6} - \frac{r_d}{2} \cdot \frac{I_d}{6}$ $U_d^2 = \frac{\sqrt{2}}{2\pi} \cdot U_2 - \Delta U - \frac{r_d}{2} \cdot \frac{I_d}{6} - \frac{r_d}{2} \cdot \frac{I_d}{6}$ $U_d^3 = \frac{\sqrt{2}}{2\pi} \cdot U_2 - \Delta U - \frac{r_d}{2} \cdot \frac{I_d}{6} - \frac{r_d}{2} \cdot \frac{I_d}{6}$ $U_d^4 = \frac{\sqrt{2}}{2\pi} \cdot U_2 - \Delta U - \frac{r_d}{2} \cdot \frac{I_d}{6} - \frac{r_d}{2} \cdot \frac{I_d}{6}$ $U_d^5 = \frac{\sqrt{2}}{2\pi} \cdot U_2 - \Delta U - \frac{r_d}{2} \cdot \frac{I_d}{6} - \frac{r_d}{2} \cdot \frac{I_d}{6}$ $U_d^6 = \frac{\sqrt{2}}{2\pi} \cdot U_2 - \Delta U - \frac{r_d}{2} \cdot \frac{I_d}{6} - \frac{r_d}{2} \cdot \frac{I_d}{6}$
		$U_d^1 = \frac{3\sqrt{2}}{4\pi} \cdot U_2 - 2\Delta U - r_d \cdot \frac{I_d}{3} - \frac{I_d}{3} \cdot \frac{r_d}{2}$ $U_d^2 = \frac{2\sqrt{2}}{4\pi} \cdot U_2 - \Delta U - \frac{r_d}{2} \cdot \frac{I_d}{3} - \frac{r_d}{2} \cdot \frac{I_d}{3}$ $U_d^3 = \frac{2\sqrt{2}}{4\pi} \cdot U_2 - \Delta U - \frac{r_d}{2} \cdot \frac{I_d}{3} - \frac{r_d}{2} \cdot \frac{I_d}{3}$ $U_d^4 = \frac{3\sqrt{2}}{4\pi} \cdot U_2 - \Delta U - \frac{r_d}{2} \cdot \frac{I_d}{3} - r_d \cdot \frac{I_d}{3}$
		$U_d^1 = \frac{3\sqrt{2}}{4\pi} \cdot U_2 - 2\Delta U - r_d \cdot \frac{I_d}{3} - \frac{r_d}{2} \cdot \frac{I_d}{3}$ $U_d^2 = \frac{2\sqrt{2}}{4\pi} \cdot U_2 - \Delta U - \frac{r_d}{2} \cdot \frac{I_d}{3} - \frac{r_d}{2} \cdot \frac{I_d}{3}$ $U_d^3 = \frac{3\sqrt{2}}{4\pi} \cdot U_2 - \Delta U - \frac{r_d}{2} \cdot \frac{I_d}{3} - r_d \cdot \frac{I_d}{3}$
		$U_d^1 = \frac{3\sqrt{2}}{4\pi} \cdot U_2 - 2\Delta U - r_d \cdot \frac{I_d}{2} - \frac{I_d}{2} \cdot \frac{r_d}{2}$ $U_d^2 = \frac{3\sqrt{2}}{4\pi} \cdot U_2 - \Delta U - r_d \cdot \frac{I_d}{2} - \frac{I_d}{2} \cdot \frac{r_d}{2}$
		$U_d^1 = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_2 - 2\Delta U - 2r_d \cdot \frac{I_d}{2}$ $U_d^2 = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_2 - 2\Delta U - 2r_d \cdot \frac{I_d}{2}$
		$U_d = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_2 - 2\Delta U - 2r_d \cdot I_d$

При обрыве трех диодов в шахматном порядке ситуация полностью совпадает с вариантом, рассмотренным в таблице 1, четвертая строка. При обрыве трех диодов положительной/отрицательной полярности напряжение на выходе выпрямителя отсутствует, так как у оставшихся диодов нет пары противоположной полярности.

Рассмотрим случаи одновременного обрыва четырех диодов трехфазного выпрямителя. Возможны два варианта данной ситуации: если оставшиеся диоды имеют разную полярность ситуация сводится к варианту, рассмотренному в таблице 1 (шестая строка); если три диода относятся к положительным/отрицательным, то напряжение на выпрямителе отсутствует. К последнему варианту также приводит одновременный обрыв пяти и шести диодов выпрямителя.

Методика моделирования обрыва диодов трехфазного выпрямителя

Эксперимент выполнялся на специализированном стенде [9, 10]. К обмотке ротора генератора (14 В, 90 А) подключается внешний лабораторный источник питания, с помощью которого регулируется сила тока. Частота вращения ротора генератора регулируется с помощью частотного преобразователя, управляющего работой трехфазного асинхронного двигателя (380 В, 2,2 кВт).

Напряжение измеряется на входе выпрямителя U_2 (линейное напряжение фаз обмотки статора) и на выходе выпрямителя U_d . Измерение тока выпрямителя I_d осуществляется путем оценки падения напряжения на токовом шунте, включенном в цепь нагрузки.

Схема подключения измерительной аппаратуры к генератору в ходе проведения эксперимента представлена на рисунке 1.

На рисунке 2 представлен трехфазный выпрямитель автомобильного генератора модели БП105, состоящий из двух алюминиевых пластин-теплоотводов с запрессованными в них диодами (три диода положительной полярности и три отрицательной полярности). Еще два отверстия в теплоотводах ва-

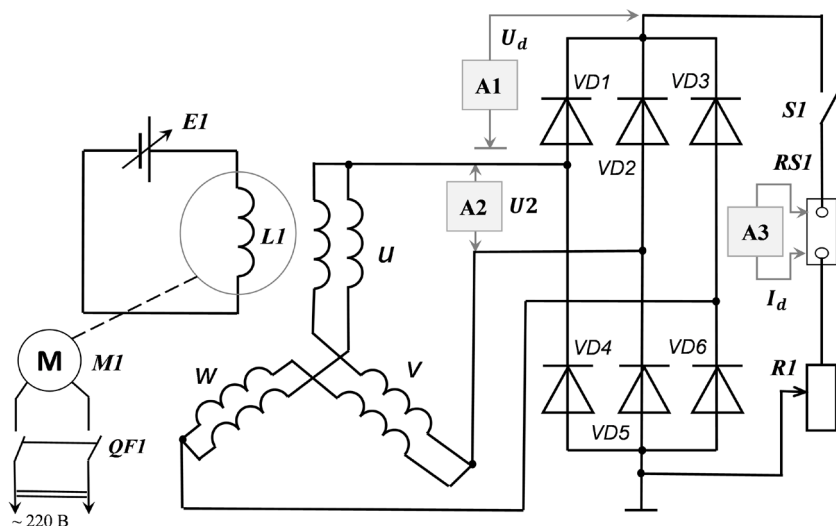


Рис. 1. Схема подключения приборов при работе генератора с трехфазным выпрямителем

A1-A3 – мультиметр Bluetooth OWON B41T+; E1 – источник постоянного тока MAISHENG MP3020D; M1 – приводной электродвигатель; L1 – обмотка ротора генератора; QF1 – автоматический выключатель; R1 – нагрузочный реостат; S1 – выключатель нагрузки; VD1-VD6 – выпрямитель.

но представить следующим выражением

$$U_d = \frac{k\sqrt{2}}{2\pi} \cdot U_2 - k \cdot \Delta U - \frac{k}{m} \cdot r_d \cdot \frac{I_d}{n} \quad (2)$$

где k – число работающих диодов выпрямителя; m – число параллельных ветвей в одной фазе; $1/n$ – максимальная доля тока через диод за полпериода.

Степень работоспособности (State of Health) трехфазного выпрямителя это показатель, равный отношению текущего значения напряжения к напряжению исправного выпрямителя при одном значении тока.

$$SOH = \frac{U_{di}(I_{di})}{U_d^{nom}(I_{di})} \quad (3)$$

где $U_{di}(I_{di})$ – текущее значение напряжения выпрямителя при заданном токе, В; $U_d^{nom}(I_{di})$ – расчетное значение напряжения исправного выпрямителя при том же токе, определенное по выражению (2), В.

Степень работоспособности трехфазного выпрямителя при возникновении обрыва одного или нескольких диодов выпрямителя может изменяться от 100% (исправное состояние) до 32% и менее при прекращении функционирования (таблица 2).

кантны, так на современных генераторах отсутствуют диоды повышения мощности, предназначенные для выпрямления третьей гармоники переменного напряжения.

Полный обрыв одного или нескольких диодов моделировался путем физического исключения их из схемы выпрямителя. Для этого разрезалась перемычка соединяющая фазы обмотки статора с парой выпрямительных диодов (рисунок 3).

На рисунке 4 представлены экспериментальные точки нагрузочных характеристик исправного выпрямителя и выпрямителей с обрывом

одного и нескольких диодов. Там же сплошной линией показаны расчетные значения, вычисленные по формулам таблицы 1. Отклонение расчетных данных от экспериментальных не превышают 2%.

Обобщенную модель напряжения трехфазного выпрямителя мож-

Таблица 2. Изменение степени функционирования трехфазного выпрямителя при обрыве диодов

SOF (%)	100	99-83	82-67
	Исправное состояние	Обрыв одного диода	Обрыв двух диодов
Диагноз	66-50	49-33	32-0
	Обрыв трех диодов	Обрыв четырех диодов	Прекращение функционирования

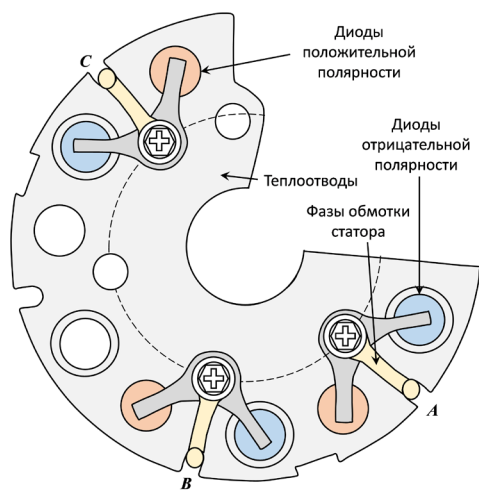


Рис. 3. Физическое моделирование полного обрыва диодов трехфазного выпрямителя автомобильного генератора

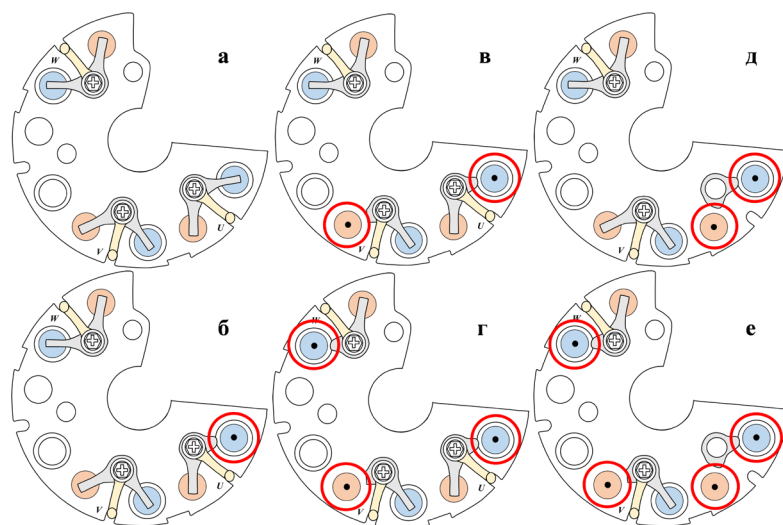


Рис. 2. Конструкция трехфазного выпрямителя автомобильного генератора а) исправный выпрямитель (шесть диодов); б) обрыв одного диода; в) обрыв двух диодов в разных фазах; г) обрыв трех диодов (в каждой из фаз); д) обрыв двух диодов одной фазы (обрыв фазы); е) обрыв четырех диодов (обрыв одной фазы+ обрыв одного из диодов остальных фаз)

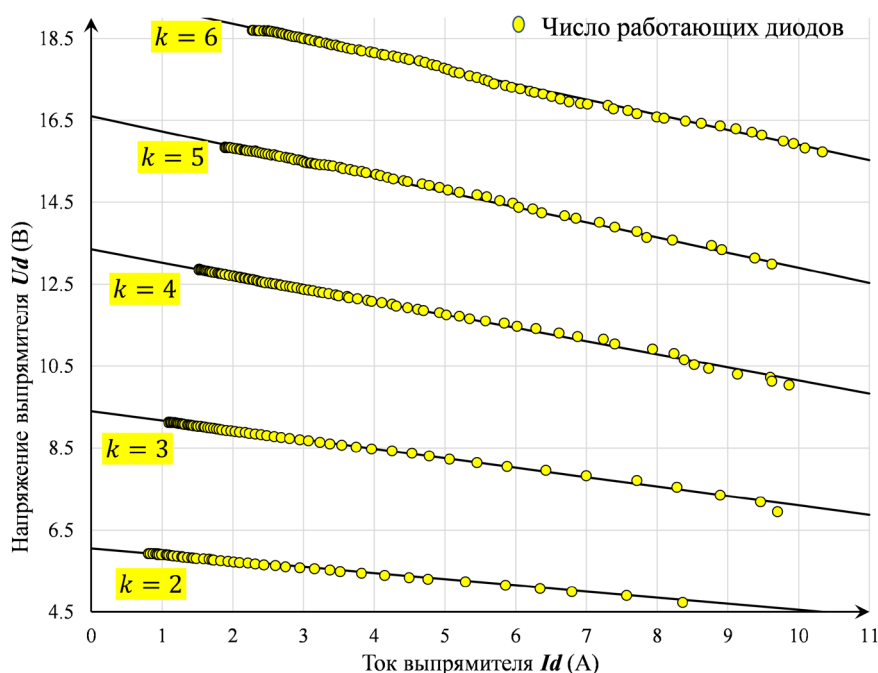


Рис. 4. Нагрузочные характеристики трехфазного выпрямителя при моделировании обрыва диодов

Выводы

Одной из основных причин выхода из строя автомобильных генераторов являются неисправности диодов выпрямительного блока. Следовательно, задача определения технического состояния выпрямителя на основе оценки его выходного напряжения является актуальной.

Аналитически напряжение выпрямителя при обрыве одного или нескольких диодов можно представить в виде суммы слагаемых, соответствующих временным отрезкам работы выпрямителя. Каждый временной отрезок характеризуется своим значением действующего линейного напряжения. Падение напряжения на диоде определяется пороговым напряжением ΔU и потерями на собственном омическом сопротивлении диода. Первая составляющая зависит от числа вновь включаемых диодов на каждом отрезке времени. Омические потери на диоде зависят от доли протекающего через диод тока.

Представлена методика моделирования обрыва диодов трехфазного мостового выпрямителя. Обрыв одного или нескольких диодов моделировался путем физического исключения их из схемы выпрямителя. Для этого разрезалась перемычка соединяющая фазы обмотки статора с парой выпрямительных диодов.

Установлено, что выходное напряжение выпрямителя определяется количеством задействованных диодов. Приводится обобщенная модель напряжения трехфазного мостового выпрямителя. Предложено вычислять степень функционирования выпрямителя как отношение текущего значения напряжения к напряжению исправного выпрямителя при одном значении тока. Установлено изменение степени функционирования трехфазного выпрямителя при полном или частичном обрыве диодов.

Обобщенная модель напряжения трехфазного выпрямителя станет частью имитационной модели, необходимой для разработки системы бортового мониторинга системы электроснабжения автомобилей.

Литература

- 1 W. Rongjie, Z. Yiju, Z. Haifeng and C. Bowen (2013) "A fault diagnosis method for three-phase rectifiers". International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 52. pp. 266-269. 10.1016/j.ijepes.2013.03.029.
- 2 M. Rahnama, A. Vahedi, A. Mohamadalkhai, B. Nahid-Mobarakeh, and N. Takorabet (2019) "Novel average value model for faulty three-phase diode rectifier bridges," Journal of Power Electronics, Vol. 19, pp. 288-295.

3 Пузаков А.В., Абельцев В.В. Классификация неисправностей выпрямителя автомобильного генератора // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: материалы Всероссийской научно-методической конференции (с международным участием). – Оренбург: ОГУ, 2020. – С. 1250-1258.

4 Кулик В.Д., Королев В.И. Аномальные режимы работы полупроводниковых выпрямителей и их диагностика: учебное пособие. – СПб.: СПбГТУРП, 2012 – 114 с.

5 M. Mürken, D. Kübel, A. Kurz, A. Thanheiser and P. Gratzfeld, "Fault analysis of automotive claw pole alternator rectifier diodes," 2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC), Nottingham, 2018, pp. 1-6.

6 P. Sivachandran, and P. Indhu (2014) "A review of three phase rectifier for automotive alternator with recent developments", International Journal of Applied Engineering Research, Vol. 9, pp. 11995-12010.

7 A. Di Gerlando, G. Foglia, M. Iacchetti, and R. Perini (2010) "Analytical Model and Implementation by Equations of Three-Phase Diode Bridge Rectifiers Operation", Proceedings of XIX International Conference on Electrical Machines (ICEM). pp. 1-6, doi: 10.1109/ICELMACH.2010.5608272.

8 Иванов, Д. В. Анализ и исследование выпрямительных блоков синхронных автомобильных генераторов // Science Time. – 2014. – №3 (3). С. 32-40.

9 Пузаков, А.В., Абельцев В.В. Исследование аномальных режимов работы выпрямителя автомобильного генератора / Транспортные и транспортно-технологические системы: материалы Междунар. науч.-техн. конф., 18 апр. 2019 г. – Тюмень: ТИУ, 2019. – С. 285-289.

10 Пузаков, А.В., Я.Ю. Осаулко Исследование теплового состояния выпрямителя автомобильного генератора // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2018. – №5. – С. 5-9.

Пузаков Андрей Владимирович.

Родился в 1978 году. Окончил Оренбургский государственный университет в 2000 году по специальности «электрический транспорт», в 2012 году – магистратуру по специальности «эксплуатация транспортных средств». В 2016 году защитил кандидатскую диссертацию по теме «Методика диагностирования автомобильных генераторов по параметрам выходного напряжения». С 2000 года работает преподавателем в Оренбургском государственном университете. В настоящее время

– доцент кафедры технической эксплуатации и ремонта автомобилей. Имеет свыше 100 публикаций, из которых 38 в изданиях из «Перечня ВАК...», 21 в журналах SCOPUS. Лауреат премии Губернатора Оренбургской области в сфере науки и техники за 2017 и 2021 годы.

Puzakov Andrey Vladimirovich.

Born in 1978. He graduated from Orenburg State University in 2000 with a degree in electric transport, in 2012 – a master's degree in vehicle operation. In 2016, he defended his Ph.D. thesis

on the topic "Methods for diagnosing automotive generators by output voltage parameters." Since 2000 he has been working as a lecturer at the Orenburg State University. Currently, he is an Associate Professor of the Department of Technical Operation and Repair of Automobiles. He has over 100 publications, 38 of which are in publications from the "List of HAC...", 21 in SCOPUS journals. Winner of the award of the Governor of the Orenburg region in the field of science and technology for 2017 and 2021.

Специализированные микросхемы для активных устройств балансировки аккумуляторных батарей в автономных электроэнергетических системах

// SPECIALIZED MICROCIRCUITS FOR ACTIVE
BATTERY BALANCING DEVICES IN AUTONOMOUS POWER SYSTEMS //

Зуев С.М.,
Российский технологический
университет – МИРЭА,
г. Москва

Варламов Д.О.,
Московский политехнический
университет,
г. Москва

В статье представлено описание основных параметров, описывающих состояние аккумуляторных систем. Показано сравнение существующих на рынке систем балансировки в зависимости от их параметров и влияния на работоспособность в терминах описывающих состояние аккумуляторных систем. Проанализированы специализированные микросхемы для активных устройств балансировки аккумуляторных батарей в автономных электроэнергетических системах. Рассмотрены преимущества трех типов микросхем для управления активной балансировкой, которые рекомендованы производителями для применения в тяговых аккумуляторных батареях электротранспортных систем. По

результатам проведенной работы можно сделать следующие выводы о том, что активные устройства балансировки аккумуляторных батарей обладают значимыми преимуществами перед пассивными устройствами балансировки. Но они обладают большей сложностью силовой схемы и стоимостью. Силовая схема устройства балансировки компании AustriaMicroSystems не имеет ограничения на количество обслуживаемых аккумуляторов в батарее, но она обладает меньшей эффективностью, чем силовая схема балансира компании Linear Technology. Устройство компании Texas instruments является наиболее простым с точки зрения конструкции и алгоритму применения, но его недостатком является то, что его силовая схема малоэффективна для больших аккумуляторных батарей, поэтому он рекомендован только для использования в батареях электроскутеров и аналогичных устройствах.

Ключевые слова: микросхема, активные устройства балансировки, аккумуляторные батареи, электроэнергетическая система, алгоритм.

The article presents a description of the main parameters that describe the state of battery systems. Specialized microcircuits for active battery balancing devices in autonomous electric power systems are considered. The advantages of three types of microcircuits for active balancing control, which are recommended by manufacturers for use in traction batteries of electric transport systems, are considered. Based on the results of the work carried out, the following conclusions can be drawn that active battery balancing devices have significant advantages over passive balancing devices. But they have a greater complexity of the power circuit and cost. The balancer power circuit from AustriaMicroSystems has no battery capacity limit, but it is less efficient than the Linear Technology balancer power circuit. The Texas instruments device is the simplest in its design and application algorithm, but its disadvantage is that its power circuit is inefficient for large batteries, so it is recommended only for use in electric scooter batteries and similar devices.

Keywords: microcircuit, active balancing devices, storage batteries, electric power system, algorithm.

Аккумуляторные батареи в современных автономных электроэнергетических системах, таких как, например, электрический транспорт, компонуются из сотен аккумуляторов (свинцовых, Li-ion и т.п.), которые в течение времени становятся несбалансированными в виду различия между их внутренними токами утечек [1-3]. Основными параметрами, описывающими состояние аккумуляторных систем (батарей) являются

оценка состояния заряда (SOC(t)), которая определяется по формуле:

$$SOC(t) = \frac{\int_{t_0}^t I_b(\tau) d\tau}{Q_0} \cdot 100\% \quad (1),$$

где $I_b(\tau)$ – зарядный ток, А; Q_0 – емкость батареи в момент времени t , А·ч.

Далее можно выделить параметр состояния здоровья аккумулятор-

ной системы (SOH), который определяется по формуле вида:

$$SOH = (\text{текущая емкость} / \text{начальная емкость}) \cdot 100\% \quad (2),$$

или в параметрах, зависящих от времени:

$$SOH(t) = SOH(t_0) + \int_{\tau=t_0}^t \delta_{finc} d\tau \quad (3),$$

где $SOH(t_0)$ — начальное состояние работоспособности батареи; δf_{unc} — это функция, зависящая от тока, тепла, SOC, электрического напряжения, механических вибраций, механических напряжений и т. д. [4,5]

Также можно выделить параметр состояние жизни (SOL) или оставшийся срок полезного использования (RUL), который определяется по формуле вида:

$$RUL = T_f - T_c \quad (4),$$

где T_f — случайный сбой во времени, ч; а T_c — текущее время, ч. [6]

SOL определяет оставшийся срок полезного использования, а именно оставшееся количество циклов нагрузки и т. д., в течение которых аккумуляторная система может точно выполнять свои функции до достижения предельного срока службы. Отказы можно предотвратить, а техническое обслуживание аккумуляторной батареи выполнять более точно, если точно спрогнозировать SOL. Прогнозирование RUL также позволяет снизить затраты, повысить точность, надежность и избежать любых сбоев и т. д. [7]

Следующий важный параметр — это состояние питания (SOP). Рассмотрим его более подробно. Каждая ячейка аккумуляторной системы имеет различное внутреннее сопротивление, которое меняется со временем/использованием, с температурой, с изменением химических свойств и других условий окружающей среды [8]. Все эти параметры влияют на значение мощности ячейки. SOP можно описать уравнением вида:

$SOP = \text{мощность аккумуляторной системы (текущая)} / \text{мощность аккумуляторной системы (начальная)}$ (5).

Далее можно выделить параметр глубина разряда (DOD), который определяет процент разряженной емкости батареи по отношению к максимальной емкости. Жизненный цикл аккумуляторной системы становится короче, когда DOD выше. Разряд до 80% обычно называют глубоким разрядом [9]. Например, свинцово-кислотные аккумуляторы имеют меньший срок службы, если глубина разряда превышает 50%.

Для достижения более длительного жизненного цикла в рабочем режиме можно использовать аккумуляторную систему большего размера с более низким DOD [10]. Глубину разряда можно определить через оценку состояния заряда по уравнению вида:

$$DOD = 1 - SOC(t) \quad (5).$$

Далее можно выделить параметр состояние функционирования аккумуляторной системы (SOF). Данный параметр определяет, насколько эффективно батарея может работать. Он вычисляется по формуле вида:

$$SOF = \frac{P - P_d}{P_{max} - P_d} \quad (6).$$

Здесь P и P_{max} — мощность и максимальная мощность, которую может обеспечить батарея, Вт; а P_d — текущая потребляемая мощность, Вт.

Далее параметр состояние энергии (SOE) определяет соотношение между оставшейся энергией E_{actual} и максимально доступной энергией E_{max} аккумуляторной системы и определяется выражением вида:

$$SOE = \frac{E_{actual}}{E_{max}} \quad (7).$$

Помимо этого, важными параметрами являются показатели состояние безопасности (SOS), жизненный цикл (EOL), конец разряда (EOD). Повысить показатели (1) – (7) с учетом оптимизации показателей SOS, EOL и EOD позволяет качественная балансировка аккумуляторных систем [11–13].

В большинстве случаев, для решения задачи балансировки на отдельных аккумуляторах в аккумуляторных системах используются несложные и надежные резистивные (или пассивные) устройства балансировки [14]. Основные методы балансировки подобных систем показан на рисунке 1.

Известно, что несовершенством пассивных устройств балансировки представляется рассеивание излишка энергии от аккумуляторов с максимальной степенью заряда на резистивных элементах (токопроводящих межсоединений и т.п.) [15]. В случае использования таких устройств балансировки для ба-

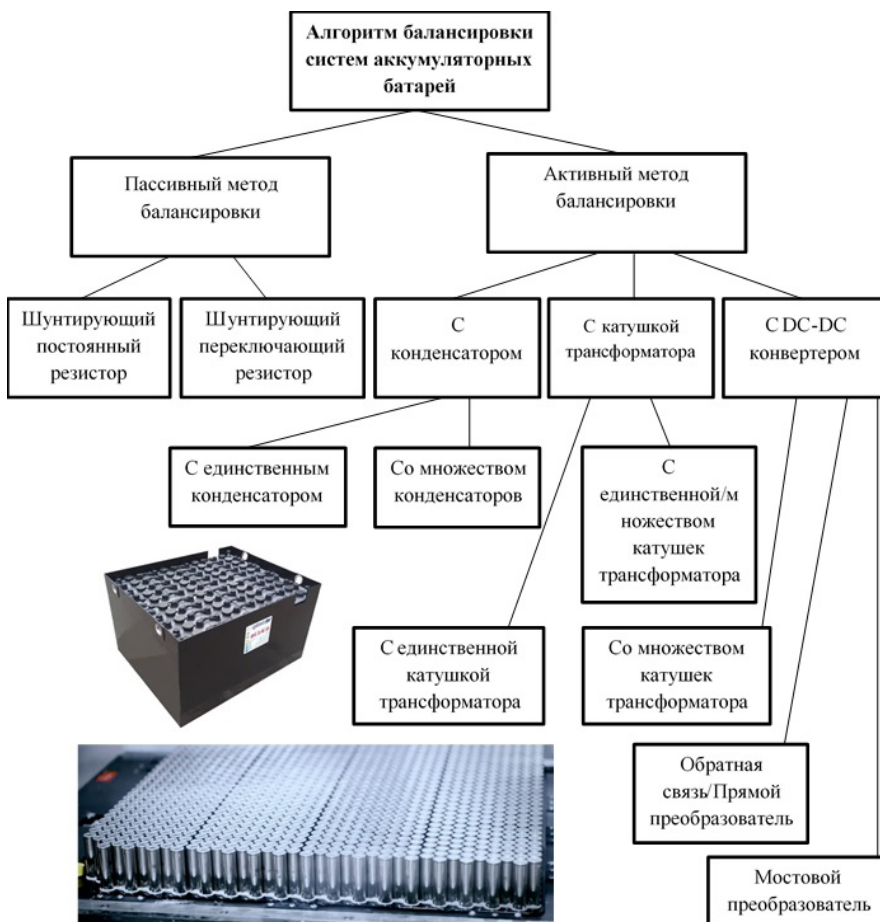


Рис. 1. Базовый алгоритм балансировки аккумуляторных батарей

тарей с аккумуляторами, емкости которых существенно отличаются, время разряда батареи будет ограничено аккумулятором с наименьшей емкостью [16]. В отличие от них, активные устройства балансировки позволяют проводить перераспределение энергии от аккумуляторов с большим зарядом к аккумуляторам с меньшим зарядом [17]. При этом, их важной особенностью является выполнение балансировки не только при заряде аккумуляторной батареи, но и при её разряде [18,19]. Активные устройства балансировки не только выравнивают заряд между аккумуляторами, но и производят его компенсацию в отличие от емкостей единичных аккумуляторов. В эталонном устройстве балансировки время разряда батареи $t_{\text{баланс}}$ обуславливается связью среднеарифметического значения емкостей всех аккумуляторов $C_{\text{ср}}$ к величине разрядного тока $I_{\text{разрядн}}$ [20]:

$$t_{\text{баланс}} : \frac{C_{\text{ср}}}{I_{\text{разрядн}}} \quad (8).$$

Сравнение существующих на рынке систем балансировки в зависимости от их параметров и влияния на работоспособность в терминах описывающих состояние аккумуляторных систем представлено в таблице 1:

В настоящее время, на рынке электрокомпонентов существует

несколько типов микросхем, управляющих активной балансировкой и рекомендованных их производителями для использования в тяговых аккумуляторных батареях электротранспортных систем. Наиболее распространенными решениями являются схемы таких производителей как AustriaMicroSystems, Texas Instrument и Linear Technology. Рассмотрим их более подробно. Основные характеристики этих устройств балансировки объединены в таблицу №2.

Проанализируем каждые из этих схем более подробно. Для начала рассмотрим систему балансировки производства Texas Instrument. Топология данного балансира следующая: ведущий контролер управления BQ78PL114 [2] осуществляет балансировку четырех последовательно соединенных аккумуляторов и управляет работой ведомых контролеров BQ76PL102 по интерфейсу PowerLAN. Каждый из них способен сбалансировать по два аккумулятора. Возможно присоединение до четырех ведомых балансиров к ведущему. Силовая схема данного балансира изображена на рисунке 3. Каждый дроссель в силовой схеме переключается между двумя соседними аккумуляторами и при этом заряжается от аккумулятора с большей степенью заряда и разряжается на аккумулятор с меньшей степенью

заряда, постепенно выравнивая на них заряд. В том случае, если аккумулятор с максимальным зарядом и с минимальным зарядом находятся на разных концах последовательной цепи батареи, эффективность передачи энергии существенно снизится. КПД такой передачи будет составлять величину:

$$\eta \approx 85\% \cdot (k+1) \quad (9),$$

где k – число аккумуляторов, располагающихся между ними. Данному балансиру необходимо наибольшее количество силовых ключей K_p , которое можно определить по формуле вида:

$$K_p = 2 \cdot (n - 1) \quad (10),$$

где n – количество аккумуляторов в батарее.

Предельное количество аккумуляторов, обслуживаемое данным устройством балансировки, составляет величину, не превышающую двенадцать штук. В связи с этим, такие балансиры могут быть использованы только в довольно компактных электроэнергетических системах, таких, например, как электроскутеры.

Рассмотрим балансирующее устройство производства компании AustriaMicroSystems. В данном балансире каждая микросхема AS8506 [3] входящая в его состав производит балансировку семи поочередно соединенных аккумуляторов (так называемых стеков). В данном случае микросхемы независимы друг от друга и могут обмениваться данными последовательно по SPI-интерфейсу.

Силовая схема балансирующего устройства представлена на рисунке 4. В ней с помощью понижающих конверторов на трансформаторах T1-Tn и диодах D1-Dn, а также силовых ключах S1-Sn происходит передача энергии от стека к аккумуляторам с наименьшей степенью заряда. Это осуществляется до тех пор, пока баланс не будет достигнут, т.е. средняя степень заряда всех аккумуляторов не станет одинаковой. Особенностью данного устройства является достаточно невысокий балансируемый ток, который рекомендован производителем [3]. Он

Таблица 1. Сравнение существующих на рынке систем балансировки в зависимости от их параметров и влияния на работоспособность в терминах описывающих состояние аккумуляторных систем

	Пассивный метод балансировки		Активный метод балансировки		
	Шунтирующий постоянный резистор	Шунтирующий переключающий резистор	Системы балансировки с конденсаторами	Системы балансировки с катушками трансформаторов	Системы балансировки с DC-DC конвертером
SOC	0,9-0,92	0,9-0,92	~0,95	~0,95	~0,95
SOH	0,9-0,92	0,9-0,92	~0,95	~0,95	~0,95
RUL	>40 000 ч.	>40 000 ч.	>40 000 ч.	>40 000 ч.	>40 000 ч.
SOP	0,9-0,92	0,9-0,92	~0,95	~0,95	~0,95
DOD	0,1-0,08	0,1-0,08	0,05	0,05	0,05
SOF	<10%	<10%	<5%	<5%	<5%
SOE	0,9	0,9	0,95	0,95	0,95
SOS	высокий	высокий	высокий	высокий	высокий
EOL	>40 000 ч.	>40 000 ч.	>40 000 ч.	>40 000 ч.	>40 000 ч.
EOD	недопустим	недопустим	недопустим	недопустим	недопустим

Таблица №2. Сравнительные характеристики устройств активной балансировки

Производитель	AustriaMicroSystems	Linear Technology	Texas Instrument
Микросхема управления	AS8506	Балансир – LT8584; Монитор – LT6804 (1 монитор на 16 балансиров)	Ведущий балансир – BQ78PL114; Ведомые балансиры – BQ76PL102
Топология	См. рис. 2б	См. рис. 2в	См. рис. 2а
Схема силовой цепи	См. рис. 4	См. рис. 5	См. рис. 5
Используемый способ передачи энергии	От батареи к аккумуляторам с наименьшим зарядом с использованием понижающих конверторов	От аккумуляторов с наибольшим зарядом к батарее с использованием повышающих конверторов	Между соседними аккумуляторами с использованием дросселя
Число используемых силовых ключей	n	n	2·(n-1), где n – число аккумуляторов в батарее
Число используемых силовых диодов	n	n	0
Максимальное число аккумуляторов, обслуживаемых одной микросхемой	Семь (где каждая микросхема представляет собой независимый модуль для работы с аккумуляторами)	Один балансир на один аккумулятор, один монитор на шестнадцать балансиров	Ведущий балансир – 4, ведомый балансир – 2, использование: 1 ведущий + 4 ведомых (максимум)
Балансировочный ток, А	0,1	2,5	1,0
Эффективность преобразования энергии	~70%	~85%	~85%
Точность измерения напряжения аккумуляторов, В	±15мВ	±4,7мВ	±10мВ
Рекомендуемая производителем область применения	Тяговые батареи электромобилей и гибридных автомобилей	Тяговые батареи электромобилей и гибридных автомобилей	Тяговые батареи электроскутеров и электровелосипедов
Преимущества	Одна микросхема на семь аккумуляторов	Высокий ток балансировки. Может быть также увеличен параллельным соединением балансиров.	Использование дросселей вместо трансформаторов
Недостатки	- Низкий ток балансировки.		
- На высоковольтной стороне трансформатора используются силовые ключи, а на низковольтной используются выпрямительные диоды.	- Балансир LT8584 устанавливается на каждый аккумулятор.	- Эффективность передачи энергии высока только между соседними аккумуляторами. Рассчитан на батарею только из 12 аккумуляторов.	
Средняя стоимость микросхемы, \$	~8,5	~5,5 (LT8584)	~10,5 (BQ78PL114)
Средняя стоимость микросхемы балансировки, в пересчете на 1 аккумулятор, \$	1,55	5,5	2,63

может быть повышен при использовании в качестве силовых ключей (которые представляют из себя модули, которые с помощью низкого напряжения Arduino могут управлять более высокой нагрузкой) полевых транзисторов большой мощности порядка 45–60 Вт. Также в этой схеме балансировочного устройства, выпрямительные диоды, используемые для преобразования переменного тока в постоянный, применяются на низковольтных сторонах трансформаторов, что приводит к уменьшению эффективности

конверторов. Также, поскольку силовые ключи находятся на высоковольтных сторонах аккумуляторной батареи, то в данном случае в качестве них нужно использовать полевые транзисторы на напряжение сток-исток. Данное напряжение пропорционально напряжению стека.

Далее рассмотрим балансировочное устройство производства компании Linear technology. Особенностью данной схемы является то, что в ней параллельно каждому аккумулятору в батарее устанавливается микросхема LT8584 [4]. Данная микросхема пе-

редает измеренные значения напряжения и тока аккумулятора в общую микросхему LT6804, которая, в свою очередь, рассчитывает степень заряда аккумулятора, а затем разрешает или запрещает проведение балансировки аккумулятора микросхемой LT8584. Всего LT6804 способна работать с шестнадцатью микросхемами LT8584 с использованием I2C интерфейса. Данная силовая схема цепи активного устройства балансировки представлена на рисунке 5. В ней с помощью трансформаторов T1-Tn, диодов D1-Dn и повышающих кон-

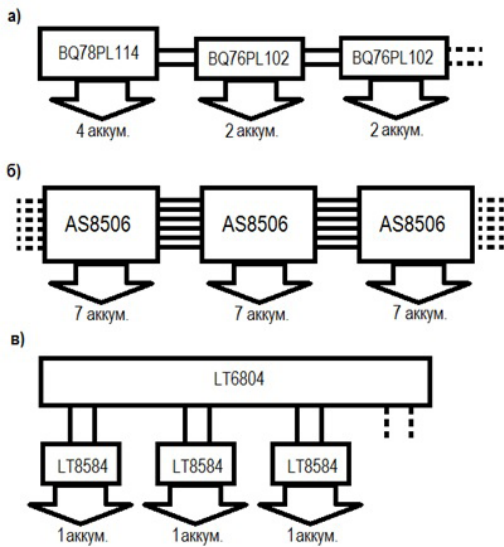


Рис. 2. Топологии устройств балансировки различных производителей. Здесь: а) Texas Instrument; б) AustriaMicroSystems; в) Linear Technology

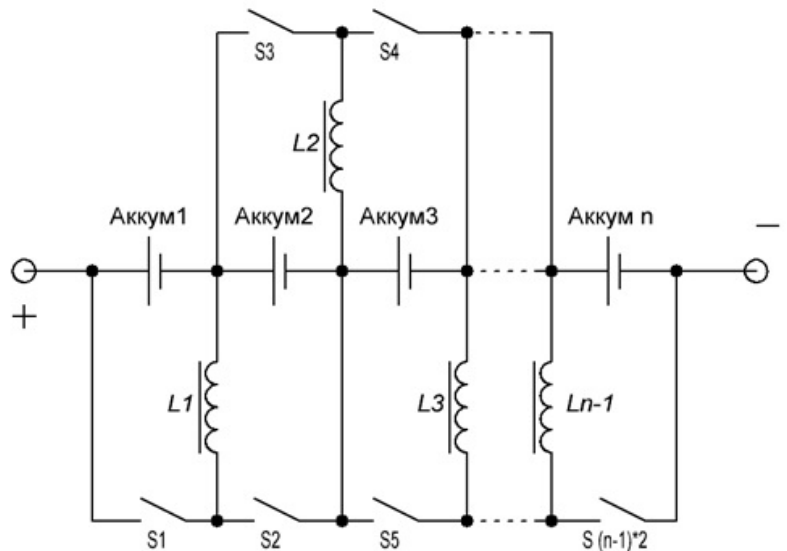


Рис. 3. Адаптированная схема силовой цепи активного устройства балансировки (производства Texas Instruments)

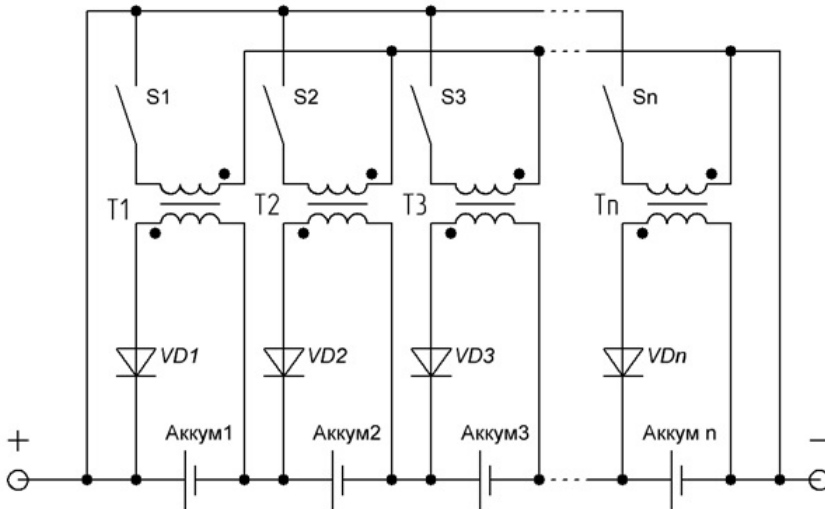


Рис. 4. Адаптированная схема силовой цепи активного устройства балансировки (производства AustriaMicroSystems)

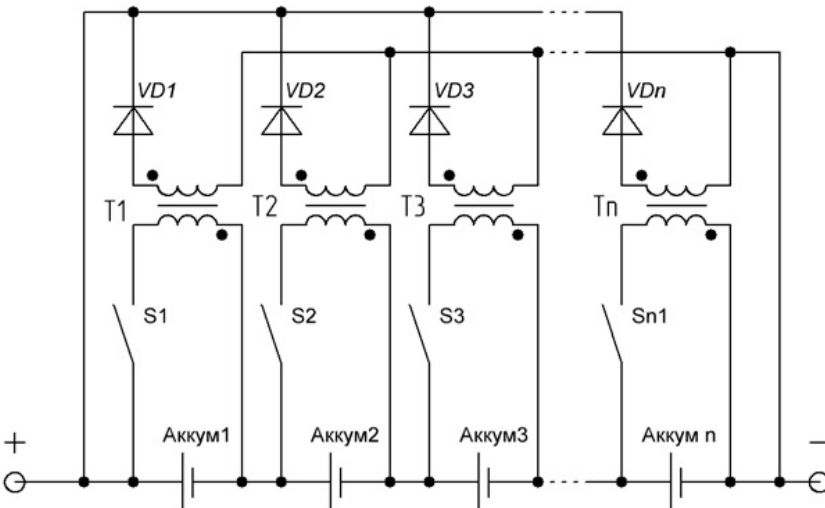


Рис. 5. Адаптированная схема силовой цепи активного устройства балансировки (производства Linear Technology)

верторов на силовых ключах S1-Sn происходит передача энергии от аккумуляторов с наибольшей степенью заряда к стеку. В данной схеме стек представляет собой шестнадцать последовательно соединенных аккумуляторов. Передача энергии происходит до тех пор, пока средняя степень заряда всех аккумуляторов не станет одинаковой. Следует отметить, что для данной схемы характерно высокое значение балансирующего тока, которое достигает величины порядка 2,5 А. Причем этот ток может быть значительно увеличен. Правилами эксплуатации допускается до двадцати параллельно соединенных LT8584. Важной особенностью является то, что стоимость отдельных микросхем такого балансира в два раза ниже, чем у конкурентов. Однако, данная балансирующая микросхема ставится не на семь или четыре аккумулятора, а на один. Поэтому в пересчете стоимость микросхемы на один аккумулятор получается дороже, чем в других схемах.

Таким образом, по результатам проведенной работы можно сделать следующие выводы:

- Устройство балансировки компании Texas instruments является наиболее простым, но его силовая схема малоэффективна для больших батарей, поэтому он рекомендован только для использования в батареях электроскутеров.

- Силовая схема балансира компании AustriaMicroSystems не имеет ограничения на количество обслуживаемых аккумуляторов, но обладает меньшей эффективностью, чем силовая схема балансира компании Linear Technology, которая может быть использована в сложных аккумуля-

муляторных системах, в том числе в электрических транспортных средствах, источниках бесперебойного питания, систем накопления энергии (ESS).

- Активные устройства балансировки, несомненно, обладают большими преимуществами перед пассивными устройствами балансировки, однако они обладают большей стоимостью и сложностью силовой схемы.

Литература:

1. D. Andrea. Battery management Systems for Large Lithium-Ion Battery Packs/Artech House, 685 Canton Street, Norwood, MA 02062/ 2010.
2. B. Singh, G.P. Singh, Y. Lehari, L. Bhatia, Y. Sehgal. Diode-Based Passive Li-Ion Battery Balancer. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. №817. 2022. P. 67-78.
3. T. Ohsaki, T. Kishi, T. Kuboki, N. Takami, N. Shimura, Y. Sato, M. Sekino, A. Satoh. Overcharge reaction of lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*. 2005. №146 (1-2). P. 97-100.
4. S.-C. Wang, G.-J. Chen, Y.-H. Liu, Y.-F. Luo, Z.-Z. Yang. An active balancer with rapid bidirectional charge shuttling and adaptive equalization current control for lithium-ion battery strings. *International Journal of Energy Research*. 2022. №46(1). P. 223-238.
5. W. Li, A. Garg, M. Xiao, X. Peng, M.L. Le Phung, V.M. Tran, L. Gao. Intelligent optimization methodology of battery pack for electric vehicles: A multidisciplinary perspective. *International Journal of Energy Research*. 2020. №44 (12). P. 9686-9706.
6. S. Panchal, J. Mcgrory, J. Kong, R. Fraser, M. Fowler, I. Dincer, M. Agelin-Chaab. Cycling degradation testing and analysis of a LiFePO₄ battery at actual conditions. *International Journal of Energy Research*. 2017. №41(15). P. 2565-2575.
7. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq78pl114.pdf>.
8. A. Barzkar, S.M.H. Hosseini. A novel peak load shaving algorithm via real-time battery scheduling for residential distributed energy storage systems. *International Journal of Energy Research*. 2018. №42 (7). P. 2400-2416.
9. <http://ams.com/eng/Products/Battery-Management/Cell-Supervision-Circuits/AS8506C>.
10. A.A. Skvortsov, S.M. Zuev, M.V. Koryachko. Electrothermal degradation of systems of metallization at non-stationary current influences. *Conference Proceedings – 2014 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2014*. 2014. №2. P. 340–343.
11. Samadani, E., Mastali, M., Farhad, S., Fraser, R.A., Fowler, M. Li-ion battery performance and degradation in electric vehicles under different usage scenarios. *International Journal of Energy Research*. 2016. №40 (3). P. 379-392.
12. <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/8584fb.pdf>.
13. A.A. Skvortsov, V.V. Rybin, S.M. Zuev. Features of electrostimulated degradation of aluminum metallization on silicon surface in the presence of dielectric steps. *Technical Physics Letters*. 2010. №36(3). P. 282–284.
14. L. Lu, X. Han, J. Li, J. Hua, M. Ouyang. A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles. *Journal of Power Sources*. 2013. №226. P. 272-288.
15. S.M. Zuev, A.M. Fironov, D.O. Varlamov, V.V. Kuksa. The search of new diagnosing and predicting methods to the thermomechanical and strength characteristics of the component base of control systems for unmanned vehicles of the "smart city" based on 5G technologies. *Journal of Physics: Conference Series*. №134. 2019. P. 012122.
16. M. Uzair, G. Abbas, S. Hosain. Characteristics of battery management systems of electric vehicles with consideration of the active and passive cell balancing process. *World Electric Vehicle Journal*. 2021. №12(3). P. 120.
17. D. Thiruvonasundari, K. Deepa. Evaluation and comparative study of cell balancing methods for lithium-ion batteries used in electric vehicles. *International Journal of Renewable Energy Development*. 2021. №10(3). P. 471-479.
18. D. Deng. Li-ion batteries: Basics, progress, and challenges. *Energy Science and Engineering*. 2015. №3(5). P. 385-418.
19. V. Yuhimenko, M. Averbukh, G. Agranovich, A. Kuperman. Dynamics of supercapacitor bank with uncontrolled active balancer for engine starting. *Energy Conversion and Management*. 2014. №88. P. 106-112.
20. S. Sharma, B. Singh. Voltage and frequency control of asynchronous generator for stand-alone wind power generation. *IET Power Electronics*. 2011. №4(7). P. 816-826.

Варламов Дмитрий Олегович.

Родился в 1982 году. Окончил Московский государственный машиностроительный университет «МАМИ» по специальности «инженер-электрик». Опыт работы – более 18 лет. В настоящее время работает старшим преподавателем кафедры «Электрооборудование и промышленная электроника» Московского политехнического университета. Автор 30 научных трудов.

Зуев Сергей Михайлович.

Родился в 1985 году. Выпускник Ульяновского государственного университета, специальность «физика металлов». Кандидат физико-математических наук. Защитил диссертацию по теме «Тепловые процессы в системах металлизаций полупроводниковых структур и керамик». Опыт работы – 14 лет. В настоящее время занимает должность доцента кафедры оптико-электронных приборов и систем РТУ МИРЭА. Автор 85 научных трудов, в том числе 5 патентов.

Varlamov Dmitry.

Born in 1982. Graduated from the Moscow State Machine-Building University "MAMI" with a degree in electrical engineering. Work experience – more than 18 years. Currently, he works as a senior lecturer at the Electrical Equipment and Industrial Electronics Department of the Moscow Polytechnic University. Author of 30 scientific papers.

Zuev Sergey.

Born in 1985. Graduate of Ulyanovsk State University, majoring in metal physics. Candidate of Physical and Mathematical Sciences. He defended his thesis on the topic "Thermal processes in the systems of metallization of semiconductor structures and ceramics". Experience – 14 years. Currently holds the position of Associate Professor of the Department of Optoelectronic Devices and Systems of the RTU MIREA. Author of 85 scientific papers, including 5 patents.

Применение накопителей энергии в качестве аварийных источников питания на метрополитене

// APPLYING ENERGY STORAGE AS EMERGENCY POWER SUPPLY SYSTEM AT UNDERGROUND RAILWAY TRAINS //

Кузнецов Г.Ю.,
ООО «Метровагонмаш-Сервис»,
г. Москва

Целью данной работы является описание существующей конструкции вагонов метрополитена моделей 81-775/776/777 «Москва-2020», включающую в себя применение тяговых накопителей энергии для использования при аварийных ситу-

ациях, а также при маневровых работах.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, вагоны метрополитена, накопитель энергии, никель-кадмиевая аккумуляторная батарея, тяговые электрические машины.

The purpose of this work is to describe the existing design of subway cars of models 81-775/776/777 "Moscow-2020", which includes the use of traction energy storage devices for use in emergency situations, as well as during shunting operations.

Keywords: railway transport, subway cars, energy storage, nickel-cadmium storage battery, traction electric machines.

Введение

В целях повышения надёжности подвижного состава, а также обеспечения требований безопасности движения, особенно в условиях пассажирских перевозок, конструкторами подвижного состава разрабатываются различные технические усовершенствования конструкции.

Одним интересным, а также инновационным, конструкторским решением стало применение на вагонах метрополитена тяговых накопителей энергии с целью обеспечения аварийного выхода состава из тоннеля, а также при маневровых работах в депо.

В настоящее время тяговыми накопителями оборудованы вагоны метрополитена моделей 81-775/776/777 «Москва-2020», спроектированные компанией ООО «ТМХ Инжиниринг» и производимые заводами

АО «МЕТРОВАГОНМАШ» и Октябрьским электровагоноремонтным заводом (ОЭВРЗ), которые являются дочерними предприятиями холдинга АО «Трансмашхолдинг».

Технически «Москва-2020» представляет собой дальнейшее развитие вагонов 81-765/766/767 «Москва», но при этом содержит достаточное количество конструктивных отличий от предшественника, позволяющих эволюционно считаться новой серией [1]. Данные вагоны метрополитена эксплуатируются на Кольцевой, Калужско-Рижской и Большой кольцевой линиях Московского Метрополитена.

Основные конструктивные параметры

Поскольку электропоезд пассажирский, то его основные конструктивные параметры направлены на

обеспечение пассажироместимости, обеспечение графика движения поездов, а также на безопасность движения. Основные конструктивные параметры представлены в таблице 1 [2].

Таблица 1. Основные конструктивные параметры электропоезда «Москва-2020».

Наименование параметра	Значение
Вместимость, чел	1490
Конструкционная скорость, км/ч	90
Ускорение, м/с ²	1,3
Ширина дверного проёма, мм	1600

Составы «Москва-2020» выпускаются в семи и восьмивагонном исполнении. Конфигурация вагонов



Рис. 1. Схема формирования составов «Москва-2020»



Рис. 2. Контейнер с тяговыми накопителями

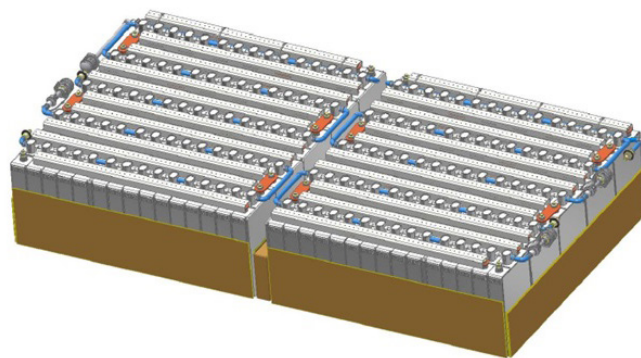


Рис. 3. Секция тяговой аккумуляторной батареи

представлена на рисунке 1. Состав включает в себя следующие составные единицы:

Вагон метрополитена модели 81-775 – моторный головной вагон (МГ), оборудованный кабиной управления, тяговыми электродвигателями, системами преобразования электрической энергии, климатконтролем, автоматического управления.

Вагон метрополитена модели 81-776 – моторный прицепной вагон (МП), отличие данного вагона от вагона модели 81-775 заключается в отсутствии кабины управления.

Вагон метрополитена модели 81-777 – немоторный прицепной вагон (НП), отличие данного вагона от вагона модели 81-776 заключается в отсутствии тяговых электродвигателей, системы преобразования электрической энергии. Также на данном вагоне и располагаются накопители электрической энергии.

Накопитель энергии

Тяговый накопитель энергии предназначен для электропитания тягового оборудования асинхронного тягового электропривода моторного вагона при отсутствии внешнего энергоснабжения контактной сети, с целью обеспечения аварийного вывода состава из тоннеля и при маневровых работах в депо. По причине больших весогабаритных характеристик, накопитель не может быть установлен в подвагонном пространстве моторного вагона. На основании этого было принято решение разместить накопители энергии на прицепных вагонах.

Контейнер с тяговыми накопителями (рисунок 2), в количестве двух штук, устанавливаются на кронштейнах рамы кузова вагона 81-777, каждый из которых предохраняется от

падения на путь десятью страховочными тросами.

В контейнере с тяговым накопителем располагается следующее оборудование:

- никель-кадмиевые аккумуляторы
- зарядное устройство
- центробежные вентиляторы;
- оборудование пожаротушения;

Основные характеристики накопителя энергии представлены в таблице 2.

Таблица 2. Основные технические характеристики тягового накопителя.

Наименование параметра	Значение
Номинальное входное напряжение постоянного тока, В	750
Диапазон изменения входного напряжения, В	от 550 до 975
Номинальный входной ток, А	40
Номинальное выходное напряжение, В	360
Номинальный выходной ток, А	390
Габаритные размеры ВхШхГ, мм	678x2374x2006
Масса, кг	2500

Основой накопителя является тяговая аккумуляторная батарея большой емкости, которая собрана из никель-кадмиевых ячеек. Тяговая аккумуляторная батарея состоит из двух секций, размещённых в двух выкатных тележках. Система автономного хода, базирующаяся на применении тяговых аккумуляторов «Saft MSX», позволяет составу

преодолеть на собственном автономном питании расстояние до 6,5 км и уклоны до четырех процентов, что является максимумом, встречающимся на маршрутах. Аккумуляторы «Saft MSX» – являются решением, удовлетворяющим в полном объеме требованиям высокого уровня безопасности и производительности при очень жестких ограничениях по размеру и весу [3].

Основные параметры аккумуляторной секции представлены в таблице 3.

Таблица 3. Основные технические характеристики тягового накопителя.

Наименование параметра	Значение
Количество аккумуляторов в батарее, шт	150
Масса батареи, кг	714
Количество аккумуляторов в блоке, шт	5
Номинальное напряжение, В	180
Ёмкость аккумулятора, Ач	130
Минимальная рабочая температура, °С	- 40
Максимальная рабочая температура, °С	+ 50

Общий вид секции батареи, которая устанавливается на одну выкатную тележку контейнера с тяговым накопителем, представлена на рисунке 3.

Принцип работы

Функциональная схема подключения тягового накопителя энергии к тяговому электроприводу вагона представлена на рисунке 4.

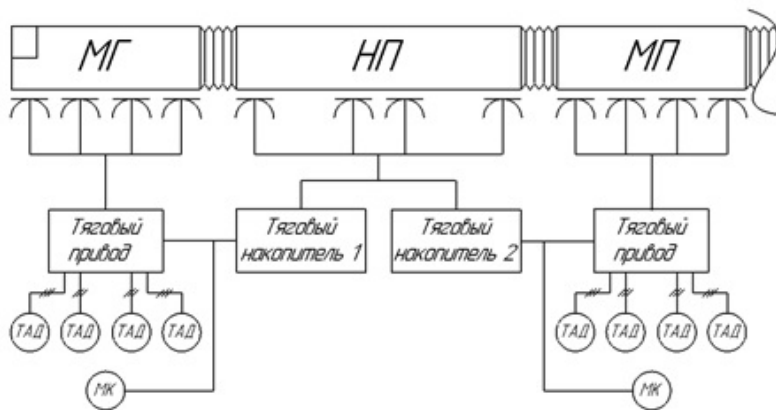


Рис. 4. Функциональная схема подключения тяговых накопителей энергии

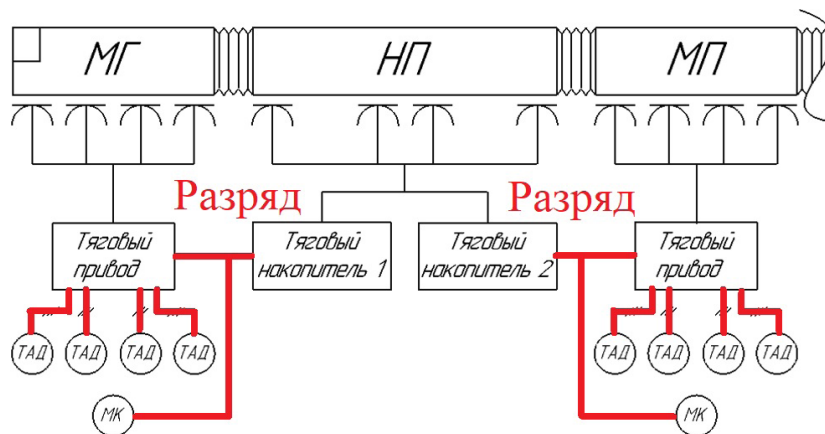


Рис. 5. Функциональная схема распределения потоков энергии в режиме автономного хода

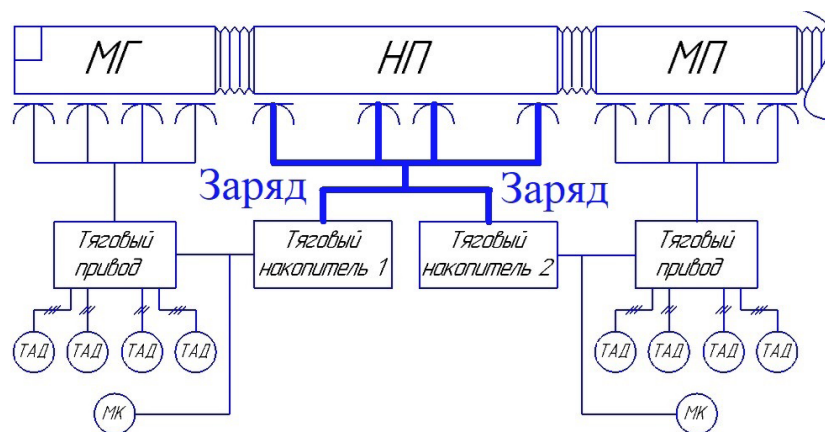


Рис. 6. Функциональная схема распределения потоков энергии в режиме заряда накопителя энергии

Накопитель энергии вводится в работу при включении машинистом режима автономного хода. В этом режиме тяговый накопитель энергии при помощи контакторов подключается к высоковольтным вводам тягового электропривода для питания тяговых асинхронных электродвигателей (ТАД) и к мотор компрессорам (МК) соседних вагонов. В режиме автономного хода напряжение аккумуляторной батареи составляет 450 В. Функ-

циональная схема распределения потоков энергии в режиме автономного хода представлена на рисунке 5.

В штатном режиме работы накопитель энергии отключен от моторных вагонов и заряжается от токоприёмников своего прицепного вагона через зарядное устройство. Функциональная схема распределения потоков энергии в режиме заряда тягового накопителя энергии представлена на рисунке 6.

Заключение

Таким образом в статье рассмотрены конструктивные особенности автономного тягового привода вагонов метрополитена моделей

81-775/776/777 «Москва 2020» с описанием принципа работы в режимах заряда и разряда тягового накопителя энергии. Установка аварийных тяговых накопителей энергии позволит сделать перевозку более безопасной, удобной и комфортной для пассажиров, позволит повысить безопасность движения поездов и соблюдение графика движения, что немаловажно при интенсивном пассажиропотоке.

Литература

1. Трансмашхолдинг. Москва 2020. Поезд нового поколения. <https://tmholding.ru/products/klyuchevye-proekty/poezd-metro-novogo-pokoleniya> (Дата обращения 17.08.2022);

2. Saft обеспечивает новые поезда "Москва 2020" Московского метрополитена энергией для инновационной системы аварийной тяги. <https://corporate.totalenergies.ru/novosti/saft-obespechivaet-novye-poezda-moskva-2020-moskovskogo-metropolitena-energiey-dlya> (Дата обращения 20.08.2022);

Кузнецов Григорий Юрьевич.

Выпускник Российского университета транспорта (РУТ МИИТ) по специальности «инженер путей сообщения». С 2020 года по настоящее время работает в компании ООО «Метроввагонмаш-Сервис», в настоящее время является начальником отдела по обслуживанию подвижного состава, а также аспирантом по специальности «техника и технологии наземного транспорта» в Российском университете транспорта (РУТ МИИТ).

Kuznetsov Grigory.

Graduate of the Russian University of Transport (RUT MIIT) with a degree in Railway Engineering. From 2020 to the present, he has been working at Metrovagonmash-Service LLC, currently he is the head of the rolling stock maintenance department, as well as a graduate student in the specialty "equipment and technology of land transport" at the Russian University of Transport (RUT MIIT).

Альтернативный алгоритм управления силовым преобразователем электровоза переменного тока в аварийных режимах

// AN ALTERNATIVE CONTROL ALGORITHM FOR THE POWER CONVERTER OF AN AC ELECTRIC LOCOMOTIVE IN EMERGENCY MODES //

Супрун Д.А.,
Дальневосточный
государственный университет
путей сообщения,
г. Хабаровск

Скорик В.Г.,
Дальневосточный
государственный университет
путей сообщения,
г. Хабаровск

Буняева Е.В.,
Дальневосточный
государственный университет
путей сообщения,
г. Хабаровск

Малышева О.А.,
Дальневосточный
государственный университет
путей сообщения,
г. Хабаровск

В статье рассмотрены характерные особенности протекания электромагнитных процессов при потере управления плечами выпрямительно-инверторных преобразователей, применяемых в электровозах переменного тока с коллекторными двигателями. Предложен альтернативный алгоритм управления преобразователем на первой и второй зонах регулирования напряжения. Проведено математическое моделирование электромагнитных переходных процессов в цепи двигателей электровоза. Выполнен анализ моделирования для нормального и аварийных режимов работы преобразователя.

Ключевые слова: электровоз переменного тока, выпрямительно-инверторный преобразователь, обрыв плеча, альтернативный алгоритм управления, система управления

The article considers the characteristic features of the flow of electromagnetic processes in the event of loss of control of reversible converter's arms used in AC electric locomotives with collector motors. An alternative algorithm for controlling the converter in the first and second voltage regulation zones is proposed. Mathematical modeling of electromagnetic transient processes in the circuit of electric locomotive engines has been carried out. The analysis of modeling for normal and emergency modes of operation of the converter is carried out.

Keywords: AC electric locomotive, reversible converter, arm break, alternative control algorithm, control system/

На отечественных железных дорогах переменного тока большую часть локомотивного парка составляют электровозы с силовыми выпрямительно-инверторными преобразователями (ВИП) для осуществления плавного регулирования напряжения на тяговых коллекторных двигателях (рис. 1).

Учитывая то, что ВИП является одним из наиболее важных электрических узлов электровоза, отклонение режима его работы от нормального негативно сказывается на работе локомотива в целом. Одним из возможных ненормальных режимов является нарушение работы штатного алгоритма управления преобразователем, в частности, отпирание одного из тиристорных

плеч ВИП [1, 2]. Причинами этого может стать обрыв в силовой части плеча в месте присоединения его к шинам выпрямленного напряжения либо неисправность в цепях управления.

В основу работы ВИП положен принцип зонно-фазового регулирования напряжения на тяговых двигателях [3]. При этом для обеспечения зонного регулирования задействуются различные секции (а1-1, 1-2, 2-х1) вторичной обмотки трансформатора электровоза. Учитывая, что соотношение номинальных напряжений этих секций составляют 1:1:2, с их помощью формируются четыре зоны регулирования выпрямленного напряжения. Вторая зона регулирования образована секцией

1-2, третья – секцией 2-х1, четвертая – секциями 1-2 и 2-х1. Для обеспечения зонного регулирования в очередной полупериод напряжения сети на тиристоры, образующие соответствующую зону, подаются импульсы управления с фазами α_1 и α_2 . Для реализации фазового регулирования, на тиристоры, не задействованные при формировании зонного регулирования, в зависимости от режима, подаются импульсы управления с фазой α_p . За счет этого действующее значение напряжения на выводах ВИП, изменяется плавно.

В качестве примера на рис. 2 представлена временная диаграмма выпрямленного напряжения U_d при работе электровоза на IV зоне регулирования в режиме тяги. На других

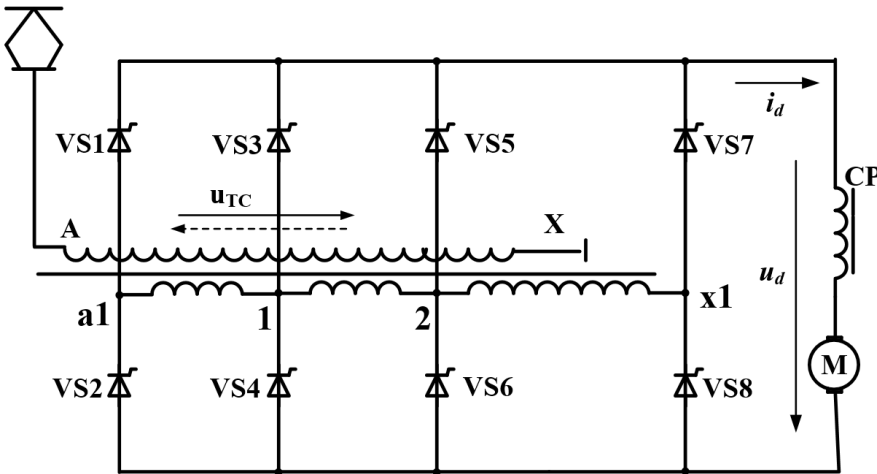


Рис. 1. Упрощенная электрическая схема ВИП электровоза

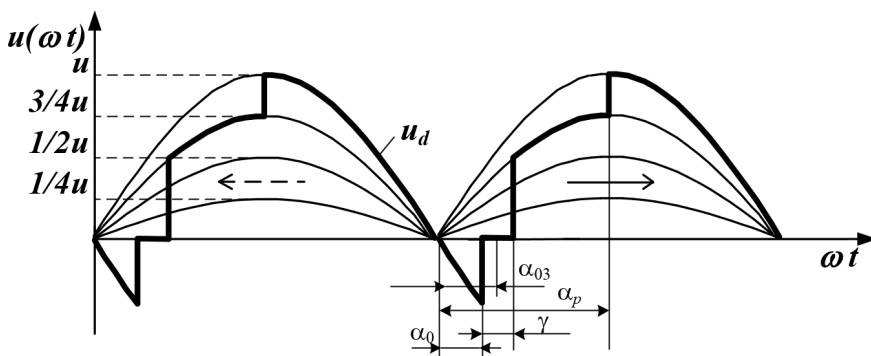


Рис. 2. Диаграмма выпрямленного напряжения при работе ВИП в режиме тяга на IV зоне регулирования

зонах регулирования кривые выпрямленного напряжения выглядят аналогично.

Так как первичное напряжение тяговой сети имеет форму, близкую к синусоидальной, выпрямленное напряжение u_d будет содержать

участки синусоид положительной полярности.

В случае нарушения управления плечом ВИП в соответствии с типовым алгоритмом управления, возникает спад уровня напряжения, ведущий к ухудшению тяговых свойств

электропривода [4]. Поэтому, при возникновении подобной ситуации, прежде всего, необходимо обеспечить работоспособность электровоза с максимально возможным сохранением его энергетических параметров, соответствующих нормальному доаварийному режиму.

Существующие способы контроля исправности ВИП, повышения его надежности и эффективности не затрагивают вопрос продолжения непрерывного функционирования электровоза в условиях потери управления тиристорным плечом [5-8].

Определяя принципы формирования альтернативного управления, необходимо учитывать, что мощность, передаваемая двигателям, определяется, прежде всего, действующим значением выпрямленного напряжения. Для сохранения энергоотдачи, следует так скорректировать подачу управляющих импульсов на тиристоры преобразователя, чтобы действующее значение напряжения при отказе плеча, осталось неизменным. Для различных зон добиться равенства действующих значений можно несколькими способами. На рис. 3 абстрактно представлена кривая выпрямленного напряжения, полупериоды которой обладают одинаковым действующим значением напряжения.

За счет перехода с типового алгоритма управления на альтер-

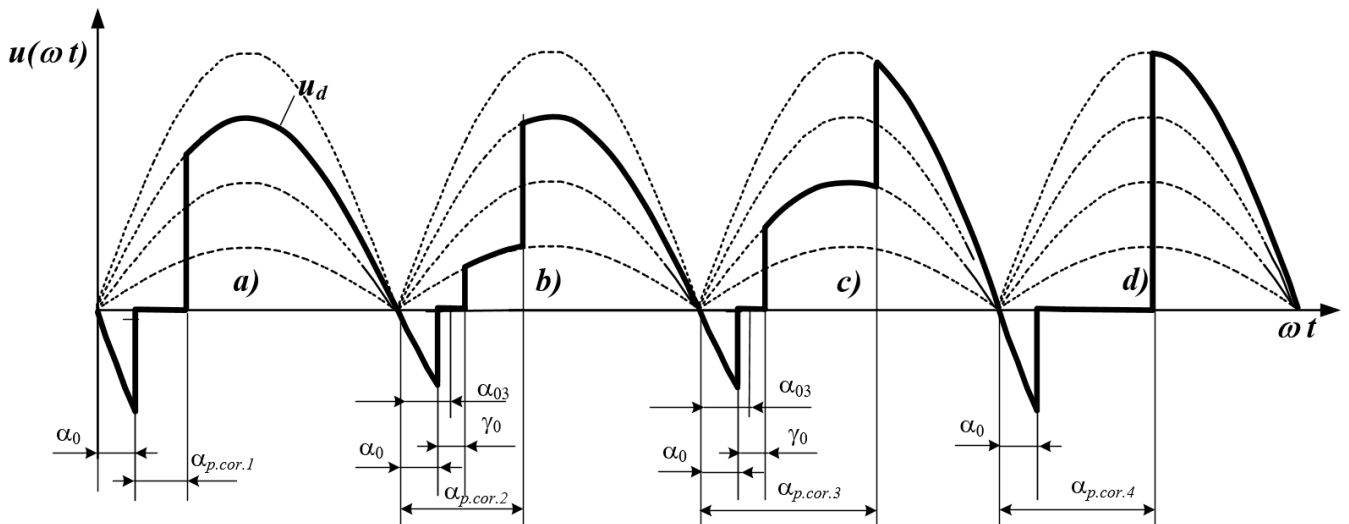


Рис. 3. Возможные варианты регулирования для сохранения действующего значения выпрямленного напряжения

- а) переход на полную зону регулирования $\alpha_p = \alpha_{p.cor1} = \alpha_0 + \gamma$;
- б) подстройка угла регулирования $\alpha_p = \alpha_{p.cor2}$;
- в) переход на более высокую зону регулирования с подстройкой $\alpha_p = \alpha_{p.cor3}$;
- г) использование для регулирования только импульсов $\alpha_p = \alpha_{p.cor4}$ «глубокое регулирование»

нативный, содержащий один из представленных выше вариантов, можно осуществить сохранение тяговых свойств электровоза в случае неотпирания плеча. Для этого при формировании сигналов требуется подстройка моментов отпирания тиристорных таким образом, чтобы минимизировать скачки напряжения и провалы тока в цепи двигателей.

Из-за конструктивных особенностей ВИП выполнить альтернативное управление с сохранением формы кривой тока двигателей физически невозможно. Более того, с увеличением номера зоны, гибкость и вариативность в альтернативном управлении снижается. К примеру, потеря управления одним из опорных тиристорных плеч на IV зоне регулирования (VS7 или VS8) не может быть скомпенсирована. В таких случаях, основной задачей сохранения работоспособности будет максимально оперативный переход на ту зону регулирования, где поврежденное плечо не задействовано. Такой подход позволит сохранить контролируемое управление приводом, пусть и с меньшей энергоотдачей.

При разработке резервного алгоритма в первую очередь следует уделить внимание тиристорным плечам преобразователя, образующим первую и вторую зоны регу-

лирования напряжения, поскольку именно они задействованы при трогании состава с места и при разгоне. Альтернативный алгоритм на более высоких (III и IV) зонах регулирования осуществляется аналогично. Однако, в отличие от первой и второй зон, не все случаи потери управления тиристорами возможно компенсировать без изменения номера зоны или с сохранением в полном объеме энергетических показателей локомотива.

Для выявления оптимального принципа резервирования штатного алгоритма была разработана математическая модель, позволяющая проводить исследование электромагнитных процессов, протекающих в преобразователе электровоза, как в исправном состоянии, так и при обрывах плеч ВИП.

После определения аналитических выражений было проведено моделирование процессов, протекающих в ВИП электровоза в различных аварийных режимах. В качестве средства для моделирования использовался программный комплекс компьютерной алгебры Maple. В результате моделирования были получены аналитические зависимости выпрямленного напряжения и тока от времени при различных условиях работы.

Проведенные исследования помогли сформулировать альтернативный алгоритм управления на первой и второй зонах регулирования при обрыве одного из тиристорных плеч. Предлагаемый алгоритм представлен в таблице 1.

В ходе моделирования было выявлено, что обрыв того или иного плеча можно однозначно определить по форме напряжения. Это дает возможность при правильном выявлении поврежденного плеча использовать предложенный альтернативный алгоритм управления.

Также было определено, что при потере управления плечом, на который подаются импульсы управления с фазой α_{03} (например, VS3 или VS4 на второй зоне регулирования), снижение тока двигателей имеет прямо пропорциональную зависимость от величины угла отпирания плеча, участвующего в фазовом регулировании (VS1 или VS2). На рис. 4 представлены диаграммы напряжения и тока в цепи двигателей электровоза, полученных по итогам моделирования. Диаграммы приведены для случаев пропуска полупериода плечом VS3 (в другом полупериоде напряжения – VS4) для случая со штатным алгоритмом управления (рис. 4, а) и альтернативным (рис. 4, б), когда момент отпирания плеча VS1 (VS2)

Таблица 1. Альтернативный алгоритм управления плечами ВИП для первой и второй зон регулирования напряжения, в зависимости от номера отказавшего плеча

Зона регулирования	Полупериод	Распределение импульсов управления по плечам ВИП							
		VS1	VS2	VS3	VS4	VS5	VS6	VS7	VS8
1 (отказ VS3 или VS4)	←	$\alpha_{p.cor}$					$\alpha_0, \alpha_{p.cor}$		
	→		$\alpha_{p.cor}$			$\alpha_0, \alpha_{p.cor}$			
1 (отказ VS5 или VS6)	←	α_0			α_0, α_p				
	→		α_p	α_0, α_p					
2 (отказ VS5 или VS6)	←			$\alpha_{p.cor}$					$\alpha_0, \alpha_{p.cor}$
	→				$\alpha_{p.cor}$			$\alpha_0, \alpha_{p.cor}$	
2 (отказ VS3)	←	$\alpha_{p.cor}$					α_0		
	→		α_p		α_{03}	α_0			
2 (отказ VS4)	←	α_p		α_{03}			α_0		
	→		$\alpha_{p.cor}$						
2 (отказ VS1 или VS2)	←								$\alpha_0, \alpha_{p.cor}$
	→						$\alpha_{p.cor}$	$\alpha_0, \alpha_{p.cor}$	

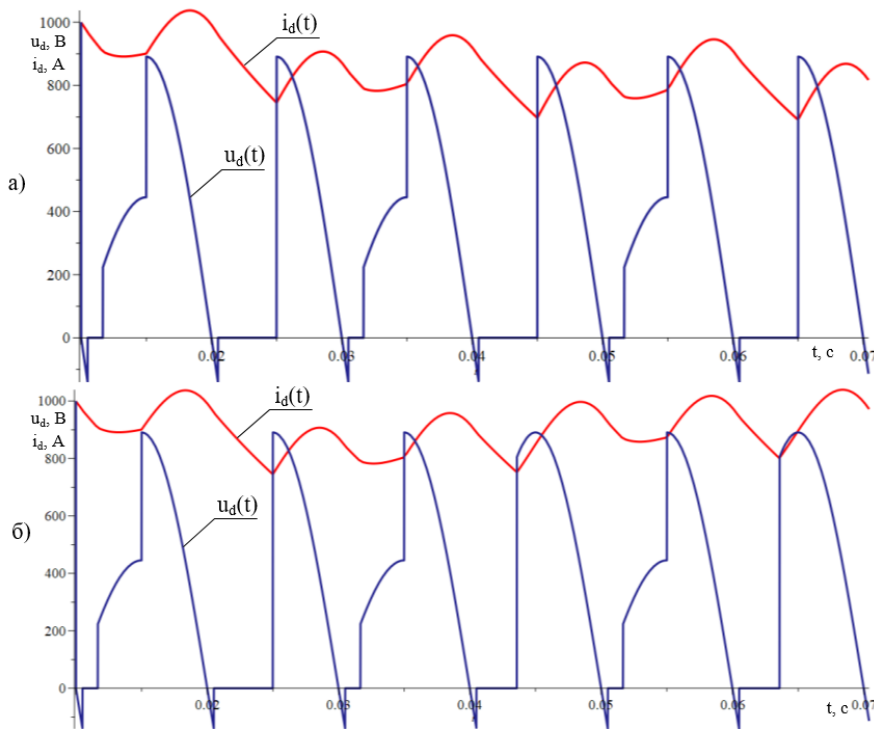


Рис. 4. Диаграммы энергетических процессов при типовом (а) и альтернативном (б) алгоритме управления в случае пропуска полупериода плечом VS3

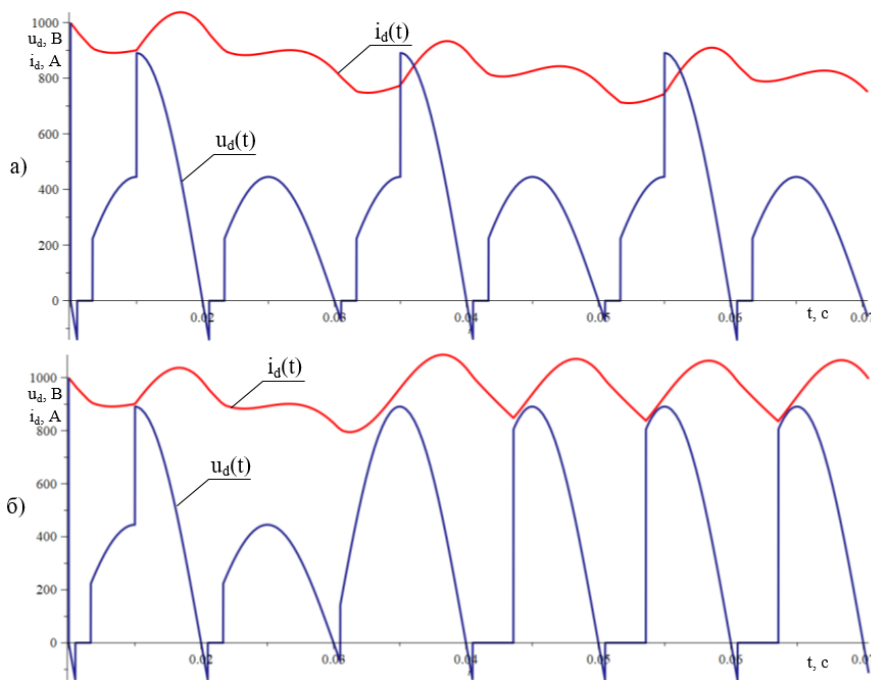


Рис. 5. Диаграммы энергетических процессов при типовом (а) и альтернативном (б) алгоритме управления в случае пропуска полупериода плечом VS1

адаптивно подобран. В случае, изображенном на рис. 4, а, наблюдается постепенное снижение уровня тока, и, после неотпирания VS3, энергоотдача значительно уменьшается. На рис. 4, б происходит постепенное восстановление общего уровня выпрямленного тока до величины, при которой отдаваемая энергия

за период сохраняется на уровне, соответствующем предаварийному режиму работы.

При возникновении отказа плеча, на который при штатном управлении подаются импульсы с фазой (например, VS1 или VS2 на второй зоне регулирования), величина угла отпирания обратно пропорциональ-

на значению выпрямленного тока. На рис. 5 представлены диаграммы токов и напряжений ВИП для случая, когда потеря управления VS1 или VS2 не компенсируется штатным алгоритмом (рис.5, а), и для случая, когда по факту выявления повреждения управление преобразователем адаптируется под изменившиеся условия эксплуатации (рис.5, б). В этом случае адаптация может быть осуществлена только путем смены опорных плеч (VS5 или VS6) с переходом на плечи VS7 или VS8 в зависимости от полупериода сетевого напряжения. Фазовое регулирование внутри зоны будет осуществляться плечами VS3 или VS4.

Такой алгоритм приведет к увеличению пульсации тока двигателей. Однако, учитывая необходимость сохранения тяговых характеристик привода, данный режим временно использовать возможно.

Наиболее тяжелым случаем для тягового электропривода является пропуск полупериода напряжения одним из плеч, на которые при штатном управлении подаются импульсы с фазой α_0 , в частности, на второй зоне – VS5 или VS6. Предположим, что в предыдущий полупериод напряжения (положительная полярность напряжения для этого момента обозначена на рис. 1 пунктирной линией) ток протекал через тиристоры плеч VS1 и VS6. Тогда, после смены полупериода сетевого напряжения, в работе остаются секции вторичной обмотки трансформатора а1-1 и 1-2. При пропуске полупериода плечом VS5 и подаче импульсов управления на тиристоры плеча VS4 происходит сетевая коммутация, и плечо VS6 запирается. В дальнейшем, несмотря на то, что напряжение на выводах обмотки а1-1 отрицательно, ток будет протекать через VS1 и VS4 за счет энергии, накопленной в магнитном поле индуктивности цепи двигателей. После подачи управляющих импульсов с фазой α_p на тиристоры плеча VS2, ВИП закорачивается через плечи VS1 и VS2, что соответствует нулевому значению напряжения на рис. 6. Таким образом, при пропуске плечом VS5 или VS6 своего полупериода, возникает существенное снижение величины выпрямленного тока.

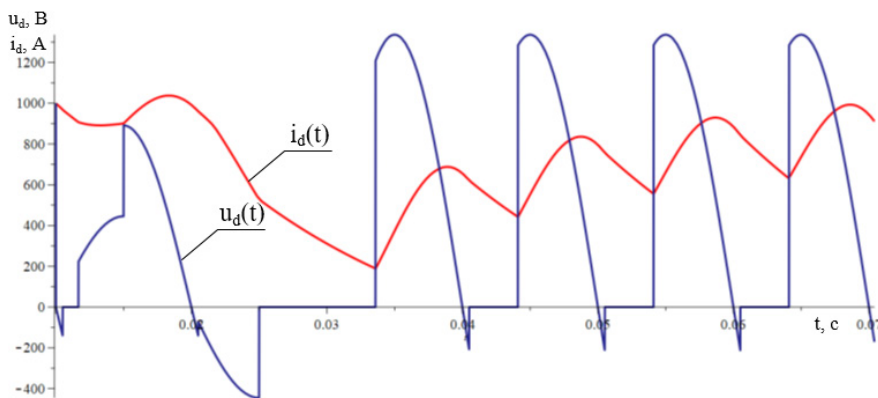


Рис. 6. Диаграммы энергетических процессов при адаптивном управлении в случае пропуска полупериода плечом VS1

Исключить описанное выше явление для классической компоновки ВИП невозможно. Однако, своевременная адаптация управления позволит компенсировать резкое снижение тока. На рис. 6 видно, что при фиксации отказа одного из опорных плеч и смены алгоритма со штатного на альтернативный происходит постепенное (за несколько периодов напряжения) восстановление уровня тока до режима, предшествующего аварийному.

В подобной ситуации (рис. 6), когда уровень тока снизился значительно, целесообразно задействовать нелинейную адаптацию управления. Тогда, в течении нескольких периодов после выявления нарушения штатного управления, угол отпираания при альтернативном управлении принудительно уменьшается, тем самым создаются условия для ускоренного восстановления необходимого уровня тока.

Представленные результаты адаптации управления во всех рассмотренных случаях свидетельствуют о возможности их практического применения с целью сохранения движения поезда по участку электрифицированной железной дороги. Результаты математического моделирования показали, что выпрямленный ток, в условиях альтернативного управления, обладает большим коэффициентом пульсации. Однако, учитывая временный характер процесса и необходимость поддержания работоспособности электровоза в целом, это является приемлемым. Предлагаемые технические решения не предусматривают изменения конструктивной и схе-

мотехнической части выпрямителя и задействуют исключительно алгоритмические принципы управления ВИП. Таким образом, реализация данных решений в составе микропроцессорной системы управления и диагностики электровоза позволит без существенных затрат повысить стабильность движения.

Так как для каждого из рассмотренных отказов альтернативное управление уникально, то функционирование предложенного алгоритма управления возможно только в совокупности с системой определения поврежденного плеча в режиме реального времени [9]. Их совместная работа позволит снизить влияние аварийных режимов работы ВИП и избежать снижения скоростных характеристик движения.

Литература

1. Бузмакова Л.В. Причинно-следственные связи дефектов и признаков их проявления в выпрямительно-инверторных преобразователях электровозов переменного тока. / Л.В. Бузмакова – Транспорт Урала. – 2008. – № 2 (17). – С. 42-46.
2. Increasing The Reliability Of Reversible Converters Of AC Electric Locomotives. Vlasievskii S., Buzmakova L., Blazhnov A. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Т. 1115 AISC. С. 321-328. DOI: 10.1007/978-3-030-37916-2_31.
3. Грузовые электровозы переменного тока: Справочник / З. М. Дубровский, В. И. Попов, Б. А. Тушканов.— М.: Транспорт, 1991.— 471 с.
4. A Method Of Diagnosing Reversible Converters Of Alternating Current Electric Locomotives.

Buzmakova L.V., Vlasievskii S.V., Ovseichik S.Z. Russian Electrical Engineering. 2016. Т. 87. № 2. С. 80-83. DOI: 10.3103/S1068371216020036.

5. Бузмакова Л.В. Стационарная система послеремонтной диагностики выпрямительно-инверторных преобразователей электровозов переменного тока в условиях имитации рабочих воздействий Бузмакова Л.В., Власьевский С.В., Овсейчик С.З. / Электроника и электрооборудование транспорта. – 2011. – № 2-3. – С. 27-31.

6. Блажнов А.И. Этапы развития диагностики электронных преобразователей магистральных отечественных электровозов переменного тока и ее перспективы / А.И. Блажнов – Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2019. № 1 (18). С. 28-32.

7. Устинов Р.И. Способ повышения работоспособности выпрямительно-инверторных преобразователей электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения / Р.И. Устинов – Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2020. Т. 63. № 1. С. 49-54. DOI:10.17213/0136-3360-2020-1-49-54.

8. Скорик В.Г. Математическое моделирование электромагнитных процессов для автоматизированной системы диагностики силовых преобразователей электровозов переменного тока. / Скорик В.Г., Буняева Е.В., Усенко Е.В. – Мехатроника, автоматика и робототехника. – 2017. – № 1.- С. 135-139.

9. Власьевский С.В. Система определения повреждений в силовом преобразователе электровоза переменного тока в режиме тяги / С.В. Власьевский, В.Г. Скорик, Д.А. Супрун, Е.В. Буняева, А.И. Блажнов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2020. – № 5 (45). – С. 71-77. DOI: 10.17084/20764359_2020_45_71.

Скорик Виталий Геннадьевич

Родился в 1981 году. В 2003 году окончил Дальневосточный государственный университет путей сообщения по специальности «Автоматическое управление электроэ-

нергетическими системами». Кандидат технических наук, доцент. В 2009 году защитил диссертацию по теме «Снижение влияния электровозов переменного тока с плавным регулированием напряжения на качество электрической энергии в контактной сети». Опыт работы – 18 лет. В настоящее время является заведующим кафедрой «Электротехника, электроника и электромеханика» ДВГУПС. Удостоен благодарностей Министерства энергетики РФ и Министерства транспорта РФ. Автор более 65 научных работ, имеет 2 патента.

Skorik Vitaly Gennadievich

Born in 1981. In 2003 graduated from the Far Eastern State Transport University majoring in «Automatic Control of the Electric Power Systems». Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor In 2009 defended the dissertation, the subject is «The reduction of the influence of the AC electric locomotives with modulated voltage regulation to the quality of the electrical energy in the the contact system». 18 years work experience. He is the head of the «Electrical Engineering, Electronics and Electromechanics» Department of the Far Eastern State Transport University. Awarded with the note of the acknowledgment of the Ministry

of Energy of the Russian Federation and the Ministry of Transport of the Russian Federation. Author of more than 65 scientific papers, has 2 patents.

Suprun Dem'yan Andreevich

Родился в 1995 году. В 2018 году окончил Дальневосточный государственный университет путей сообщения, направление подготовки – «Электроэнергетика и электротехника». Опыт работы – 4 года. В настоящее время является преподавателем кафедры «Электротехника, электроника и электромеханика» ДВГУПС. Автор 5 научных работ.

Suprun Demian Andreevich

Born in 1995. In 2018 graduated from the Far Eastern State Transport University, majoring in Power «Engineering and Electrical Engineering». 4 years work experience. He is the lecturer of the «Electrical Engineering, Electronics and Electromechanics» Department of the Far Eastern State Transport University. He is the author of the 5 scientific papers.

Мальшева Ольга Александровна

Родилась в 1983 году. В 2005 году окончила Дальневосточный государственный университет путей сообщения по специальности «Электроснабжение железных дорог».

Кандидат технических наук. В 2008 году защитила диссертацию по теме «Внутрисистемный учет электрической энергии и контроль ее качества на электровозах переменного тока». Опыт работы – 16 лет. В настоящее время является доцентом кафедры «Электротехника, электроника и электромеханика» ДВГУПС. Имеет благодарственные письма от Министерства энергетики РФ, ОАО «РЖД», Министерства образования и науки Хабаровского края. Автор 42 научных работ.

Malysheva Olga Alexandrovna

Born in 1983. In 2005 graduated from the Far Eastern State Transport University majoring in Railway Power Supply. Ph.D. in Engineering Science In 2008 defended the dissertation, the subject is «The intra-system accounting of the electric energy and the control of its quality on the AC electric locomotives». 16 years work experience. She is the associate professor of the «Electrical Engineering, Electronics and Electromechanics» Department of the Far Eastern State Transport University. She has notes of acknowledgment from the Ministry of Energy of the Russian Federation, Russian Railways, the Ministry of Education and Science of the Khabarovsk Region. She is the author of the 42 scientific papers.

Использование бортовых накопителей энергии на городском рельсовом транспорте

// THE USE OF ON-BOARD ENERGY STORAGE DEVICES IN URBAN RAIL TRANSPORT //

**Шаряков В.А., к.т.н.,
Петербургский государственный
университет путей сообщения
Императора Александра I,
г. Санкт-Петербург**

**Шарякова О.Л., к.т.н.,
Санкт-Петербургский
государственный
архитектурно-строительный
университет,
г. Санкт-Петербург**

**Марков К.В.,
Петербургский государственный
университет путей сообщения
Императора Александра I,
г. Санкт-Петербург**

Современная электротехническая база позволяет все больше отказываться от использования не возобновляемого топлива и переходить на электрический транс-

порт. Проблемой, возникающей при эксплуатации электрического подвижного состава, является неавтономность некоторого вида общественного транспорта.

В данной работе предлагаются результаты по внедрению и испытанию на городском транспорте накопителя электрической энергии, состоящего из конденсаторных модулей.

В результате подключения в силовую цепь трамвая накопителя электрической энергии установлено его положительное влияние на работу привода. Удалось добиться снижения среднего потребляемого тока, существенно снизился расход электроэнергии на тягу.

Ключевые слова: накопитель электрической энергии, электрический подвижной состав, городской электротранспорт, тяговый электропривод, расход электроэнергии.

В условиях быстрого роста современных городов требования, предъявляемые к инфраструктуре, повышаются. Новые жилые районы появляются настолько быстро, что зачастую инфраструктура не успевает за темпами строительства. Среди обеспечения населения медицинскими, дошкольными и школьными заведениями немаловажную роль играет и транспортная доступность. Перемещение большого количества пассажиров по выделенной, изолированной от автомобильного транспорта линии, является наиболее оптимальным решением для города. Как нельзя лучше для этого подходит городской рельсовый транспорт. К сожалению, реализация трамвайного движения связана с большими затратами на организацию электроснабжения и дорожно-

го (рельсового) полотна. Построение новой контактной сети в свою очередь может оказывать дополнительное влияние на городскую энергетическую сеть.

Для того чтобы избежать негативного влияния новых участков и упростить их строительство все большую популярность набирает городской автономный электрический транспорт, который не зависит от питания контактной сети при движении на участках пассажирских маршрутов. Установка бортовых накопителей энергии позволяют решать вопросы питания электрического транспорта на этапе его производства, и в итоге потребитель получает готовый продукт с минимальными вложениями в инфраструктуру [1].

The modern electrical base makes it possible to increasingly abandon the use of solid fuels and switch to electric transport. The problem that arises during the operation of electric rolling stock is its non-autonomy.

In this paper, we propose the results of the introduction and testing of an electric energy storage device consisting of capacitor modules in urban transport.

As a result of connecting one of the tram trolleys of the accumulator to the power circuit, its positive effect on the operation of the drive was established. It was possible to achieve a reduction in the average current consumption, significantly reduced the consumption of electricity for traction.

Keywords: electric energy storage, electric rolling stock, urban electric transport, traction electric drive, electricity consumption.

В качестве испытания данной технологии на односекционном трамвайном вагоне на тяговый привод первой тележки (БСПТ) был установлен накопитель электрической энергии (НЭЭ), состоящий из 7 конденсаторных модулей, включенных последовательно, производства «ТЭЭМП» МЛСК 56-150 (рис. 1). Каждый модуль рассчитан на номи-



Рис. 1. Внешний вид НЭЭ

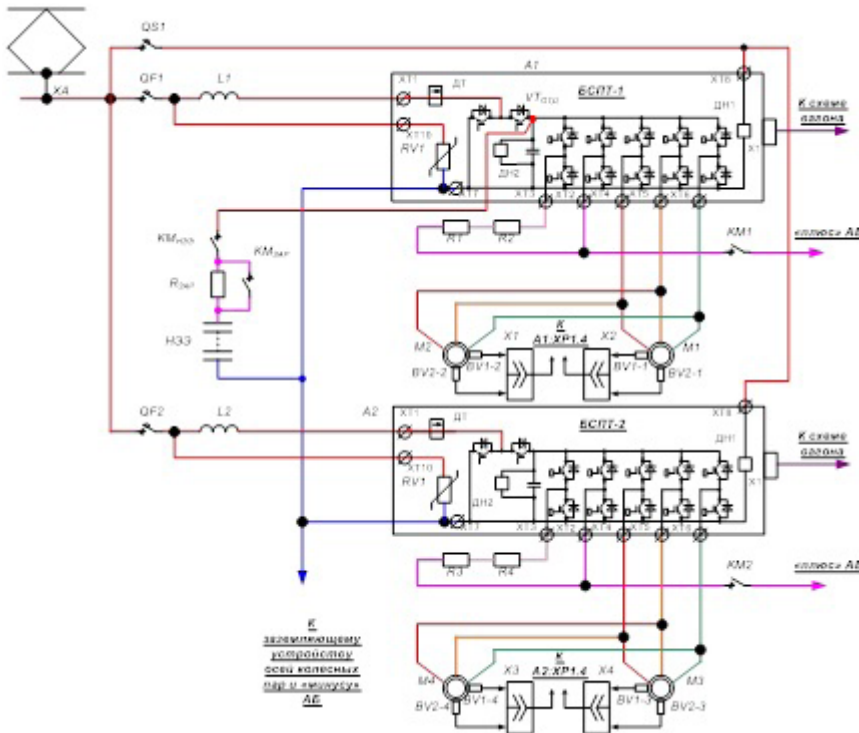
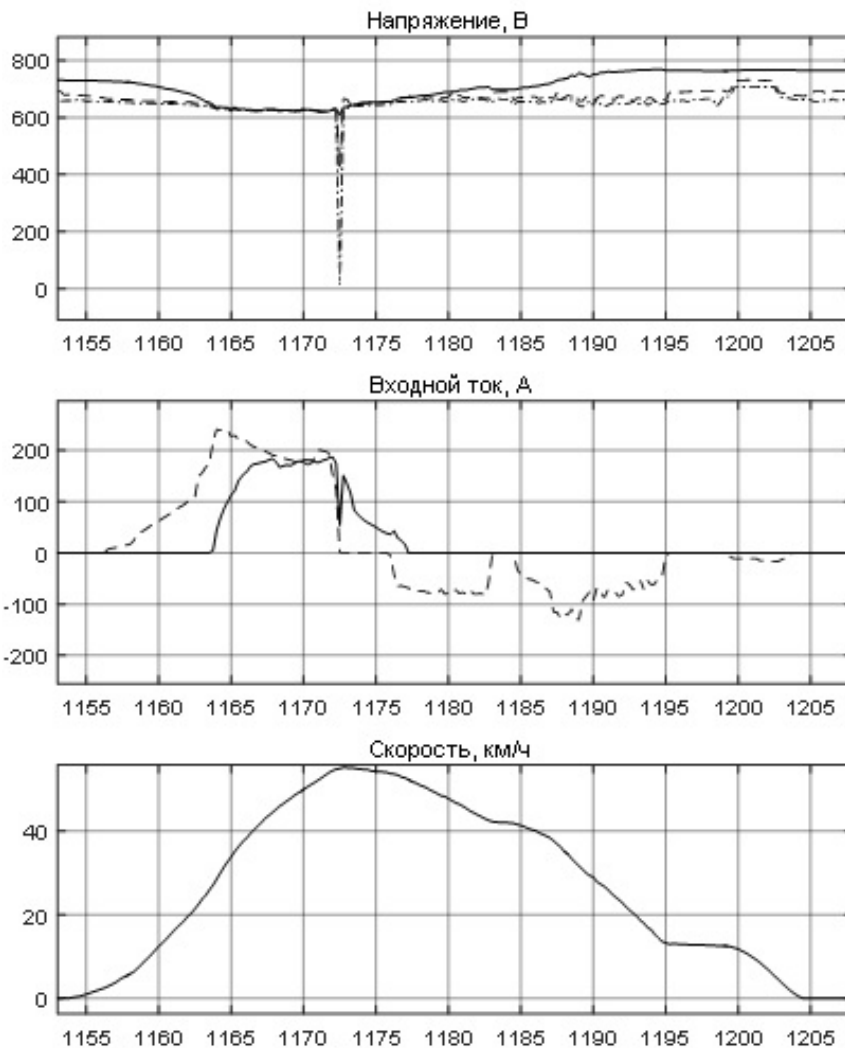


Рис. 2. Подключение НЭЭ к тяговому приводу первой тележки



012110

Рис. 3. Графики изменения напряжений, тока и скорости (фрагмент)

нальное напряжение 151 В и имеет емкость в 56 Ф. Сфера их применения включает использование для электробусов, троллейбусов, железнодорожного транспорта, в метрополитене, а также для компенсации пиковых нагрузок сети [2].

На данном трамвае установлены два тяговых привода для каждой тележки с одинаковыми настройками, обеспечивающими тяговые характеристики вагона, что позволило сравнить энергетические показатели тележки с установленным НЭЭ и без НЭЭ. Для полного использования энергии НЭЭ программным способом был выключен транзистор VTOTD первого тягового преобразователя (БСПТ) и увеличен порог включения тормозного транзистора до 780В [3].

На рисунке 2 представлена схема подключения НЭЭ к тяговому приводу первой тележки трамвая.

В рамках опыта была совершена пробная поездка от т/п №7 до конечной станции Рыбацкое и обратно. Движение происходило в штатном режиме работы трамвая на линии с остановками на пунктах посадки-высадки пассажиров. В ходе поездки производилась запись основных энергетических характеристик вагона.

На рисунке 3 приведены фрагменты графиков изменения напряжений на фильтре тягового преобразователя, тока и скорости, полученные при движении. Сплошной линией показаны значения для тележки с установленным НЭЭ, пунктирной для заводской тележки. Штрихпунктирная линия показывает напряжение контактной сети.

Из приведенных графиков видно, что при разгоне наблюдается значительное уменьшение потребляемого тока из контактной сети тяговым приводом, оснащенным НЭЭ. В режиме торможения рекуперативная энергия аккумулируется в НЭЭ. Кроме того, использование НЭЭ уменьшило пульсацию напряжения на фильтре тягового преобразователя.

Изменение тока НЭЭ показано на рисунке 4. Из рисунка следует, что максимальный потребляемый ток от НЭЭ составил 215А, максимальный ток заряда НЭЭ – 191А, среднее значение потребляемого тока от НЭЭ –

14А, среднее значение тока заряда НЭЭ от контактной сети – 5А.

Дополнительно была проверена возможность движения трамвайного вагона без питания от контактной сети в режиме «автономного хода» при работе только одной тележки. Графики изменения напряжений, скорости и пройденного пути для данного режима движения приведены на рисунке 5. Трамвай без ограничения динамических свойств прошел 957 метров, разрядив НЭЭ с 704В до 29,5В.

Результат определения среднего потребляемого тока каждой тележки за один цикл разгона-торможения показан на рисунке 6. Фрагмент графика взят для участка движения с максимальным средним значением потребляемого тока, который для первой тележки составил 120 А, а для второй 137,3А.

Графики изменения входных токов и их среднего значения при движении для первой (сплошная линия) и второй (пунктирная линия) тележек приведены на рисунке 7, а для всего маршрута и рисунке 7, б для его фрагмента с наибольшим входным током. Из графиков видно, что среднее значение потребляемого тока на тягу первого тягового преобразователя составляет 26А, второго 45А. Таким образом, в варианте с НЭЭ средний потребляемый ток получается на 40% меньше.

Также были получены результаты изменения затрачиваемой энергии на тягу из контактной сети. Графики представлены также для первой (сплошная линия) и второй (пунктирная линия) тележек при движении по всему участку (рис. 8, а) и его части (рис. 8, б). Расход электроэнергии составляет 282,7 Вт·ч и 387,7 Вт·ч, с использованием конденсаторных модулей и без них соответственно. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что в варианте с НЭЭ экономится до 40% энергии.

На рисунке 9 приведены графики изменения напряжения, токов и скорости за время движения от одного остановочного пункта до другого. Сплошной линией обозна-

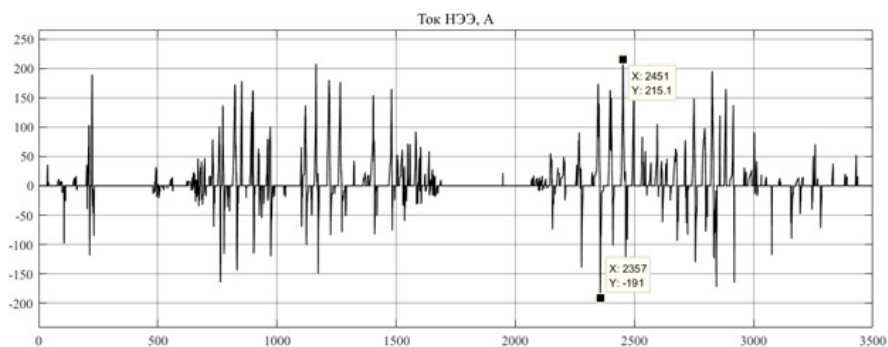


Рис. 4. График изменения тока НЭЭ

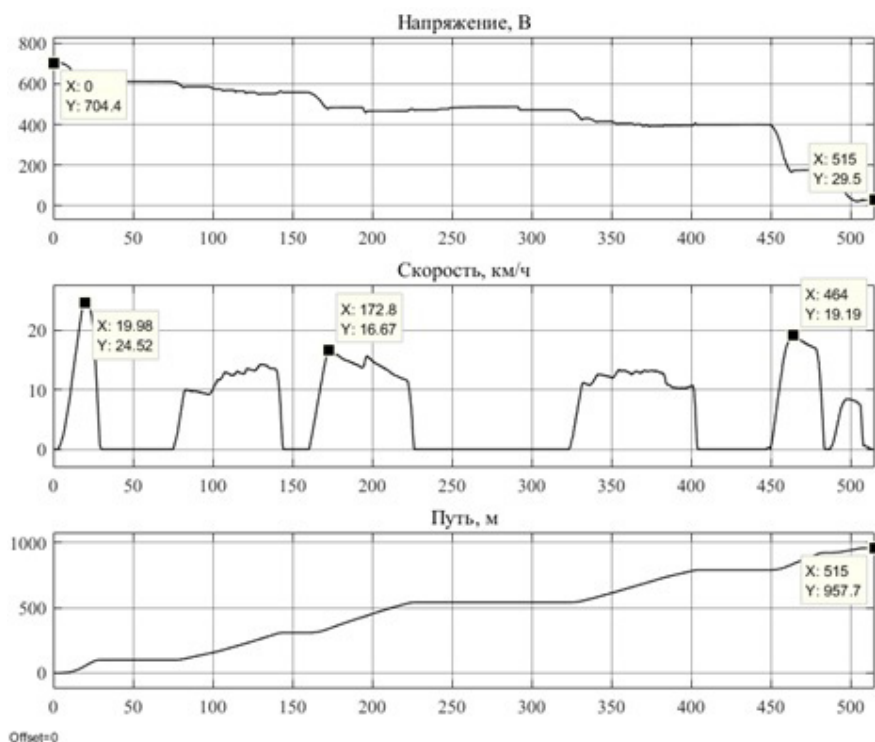


Рис. 5. Графики изменения напряжений, скорости и пройденного пути при движении в режиме «автономный ход»

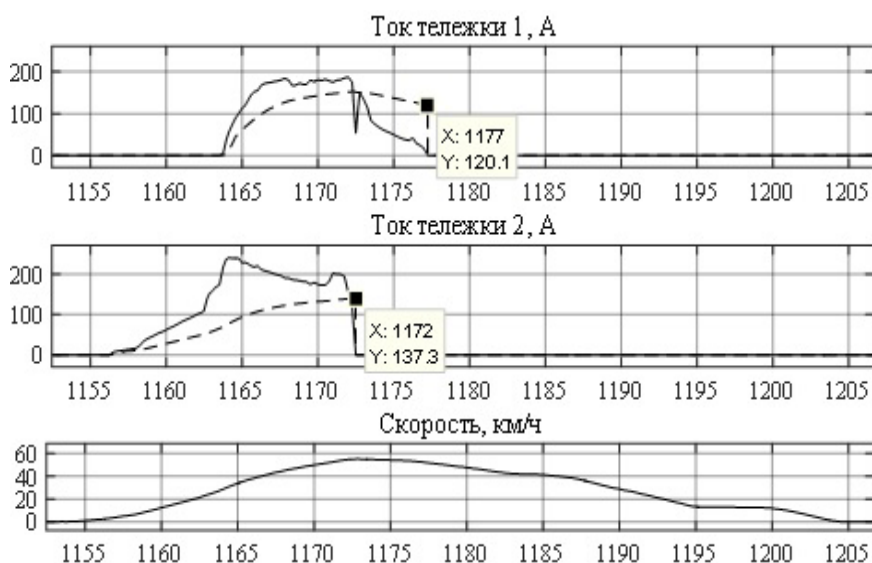


Рис. 6. Среднее значение потребляемого тока каждой тележки за один цикл разгон-торможение

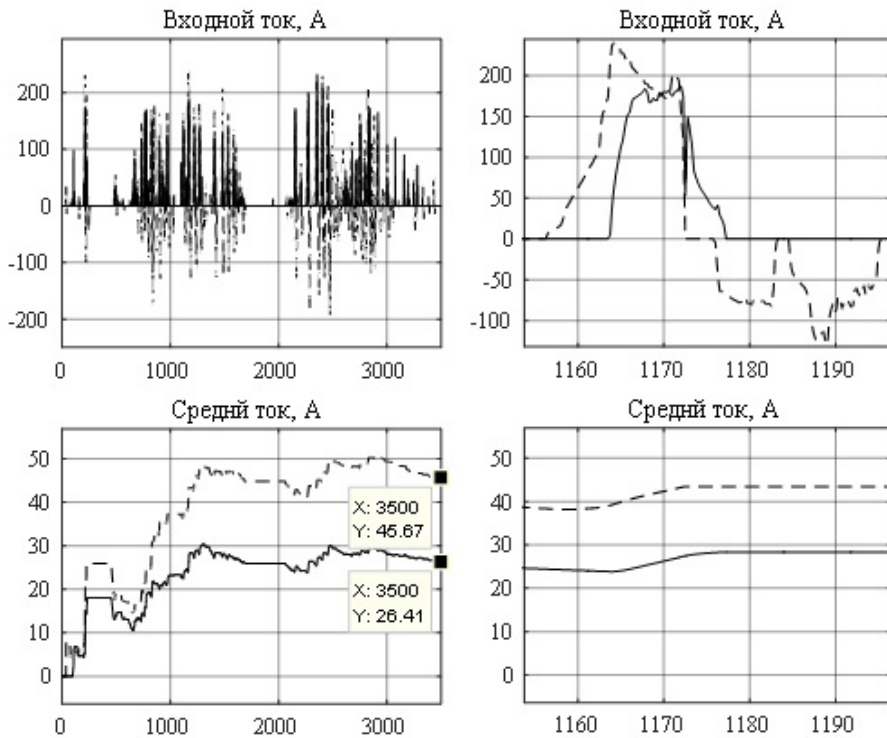


Рис. 7. Графики изменения входных токов и их среднего значения при движении

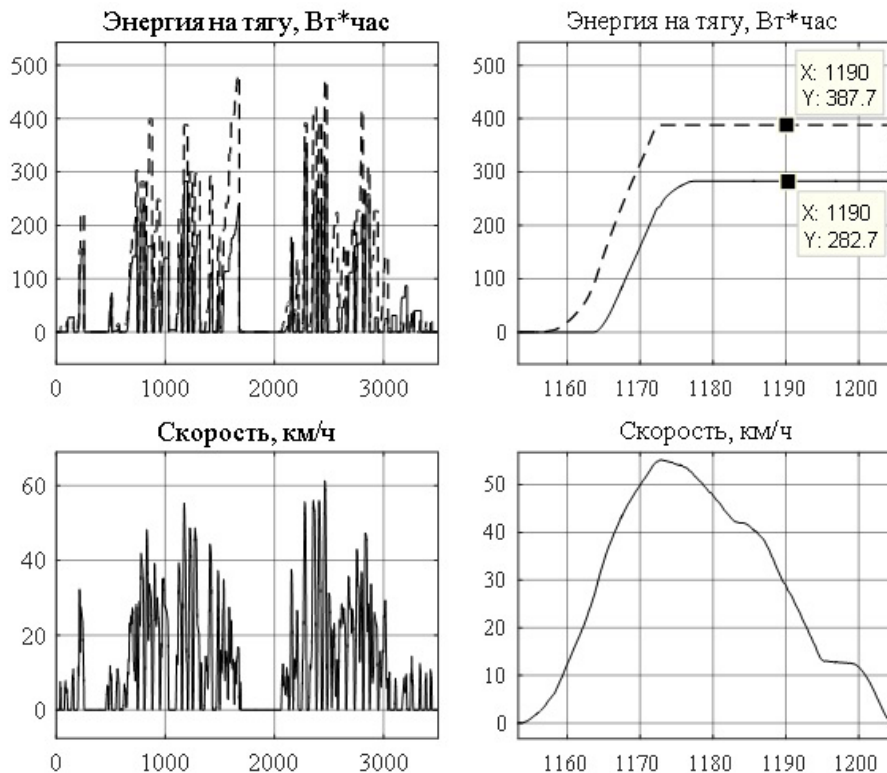


Рис. 8. Графики изменения энергии и скорости

чены напряжение на фильтре и ток контактной сети первой тележки. Пунктирная линия показывает ток контактной сети второй тележки. Штрихпунктирная линия показывает напряжение контактной сети. Полученные экспериментально данные позволяют выполнить расчет величины электрической энергии

НЭЭ, которая используется для разгона трамвая, мДж

$$E_{НЭЭ} = C_{НЭЭ} \frac{U_{\max}^2 - U_{\min}^2}{2},$$

где $C_{НЭЭ}$ – емкость конденсаторного накопителя,

U_{\max}, U_{\min} – значения максимального и минимального напряжений

на фильтре тягового преобразователя первой тележки.

$$E_{НЭЭ} = \frac{56}{7} \cdot \frac{730,5^2 - 635,5^2}{2} = 0,52 \text{ мДж}$$

Литература

1. Доманов, К. И. Исследование режимов работы системы тягового электроснабжения в целях установки накопителя электрической энергии / К. И. Доманов, В. Л. Незевак, А. П. Шатохин // Известия Транссиба. – 2018. – № 2(34). – С. 65-75.
2. Моделирование бортовых систем хранения энергии для гибридного тягового привода / О. С. Валинский, Т. С. Титова, В. В. Никитин, А. М. Евстафьев // Электротехника. – 2020. – № 10. – С. 14-18.
3. Об автоматической стабилизации напряжения контактной сети электрического подвижного состава / Т. П. Сацук, В. А. Шаряков, О. Л. Шарякова [и др.] // Электротехника. – 2021. – № 4. – С. 36-40.

Шаряков Владимир Анатольевич.

Родился в 1976 году. В 2000 году окончил Санкт-Петербургский институт машиностроения «ЛМЗ-ВТУЗ» по специальности «Автоматизация технологических процессов и производств». Кандидат технических наук, доцент. В 2004 году защитил диссертацию по теме «Интегрирование частотно-управляемых асинхронных электроприводов в автоматизированные системы машинных агрегатов». Опыт работы – 20 лет. В настоящее время работает исполнительным директором АО «НПП «ЭПРО». Имеет 35 научных публикаций.

Шарякова Ольга Леонидовна.

Родилась в 1969 году. В 1993 году окончила Санкт-Петербургский институт машиностроения «ЛМЗ-ВТУЗ» по специальности «Автоматизация технологических процессов и производств». Кандидат технических наук, доцент. В 2004 году защитила диссертацию по теме «Синтез алгоритмов управления электромеханическими системами вибрационных установок». Опыт работы – 26 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры электроэнергетики и

director of “NPP EPRO” JSC. He has 35 scientific publications.

Sharyakova Olga.

Was born in 1969. In 1993 she graduated from the St. Petersburg Institute of Mechanical Engineering “LMZ-VTUZ” with a degree in “Automation of technological processes and production”. Candidate of technical sciences, associate professor. In 2004 she defended her thesis on the topic “Synthesis of control algorithms for electromechanical systems of vibration machines”. Work experience is 26 years. She works as an associate professor of the Department of Electric Power Engineering and Electrical Engineering of the St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering.

Makarova Elena.

Was born in 1975. In 1997 she graduated from St. Petersburg State Transport University majoring in “Water supply, water disposal, sustainable utilization and protection of water bodies”. Doctor of engineering science, professor. In 2012 she defended the dissertation with topic “Scientific basis of environmental protection under decommissioning, detoxification and blockage of pollution from rail transport”. He has 28 years of work experience. At present she works as professor at the Department of electric traction of PGUPS. She has more than 200 scientific works.

Markov Kirill.

Was born in 1994. In 2016 he graduated from the PGUPS with a degree in “Rolling stock of Railways”. Work experience is 3 years. At present he is a works as an assistant at the Department of electric traction of PSUPS.

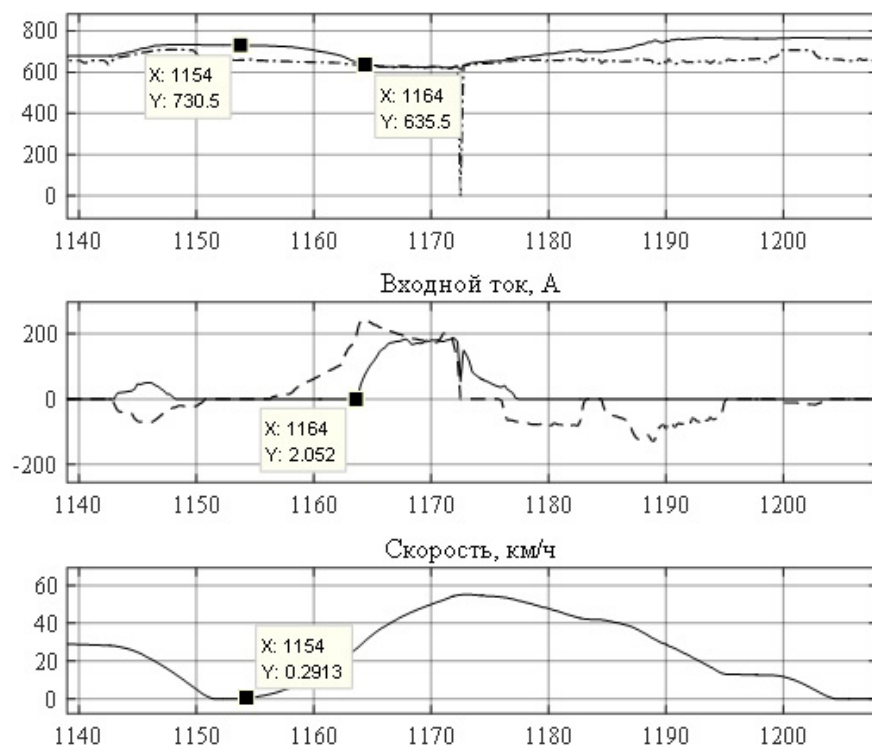


Рис. 9. Графики изменения напряжения, токов и скорости за время движения

электротехники Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета.

Макарова Елена Игоревна.

Родилась в 1975 году. В 1993 году окончила ПГУПС по специальности «Водоснабжение, водоотведение, рациональное использование и защита водных объектов». Доктор технических наук, профессор. В 2012 году защитила диссертацию по теме «Научные основы защиты окружающей среды при ликвидации, обезвреживании и блокировании загрязнений железнодорожного транспорта». Опыт работы – 28 лет. В настоящее время работает профессором кафедры «Электрическая тяга» ПГУПС. Имеет более 200 научных работ.

Марков Кирилл Викторович.

Родился в 1994 году. В 2016 году окончил ПГУПС по специальности «Подвижной состав железных дорог». Опыт работы – 3 года. В настоящее время работает ассистентом на кафедре «Электрическая тяга» ПГУПС.

Sharyakov Vladimir.

Was born in 1976. In 2000 he graduated from the St. Petersburg Institute of Mechanical Engineering “LMZ-VTUZ” with a degree in “Automation of technological processes and production”. Candidate of technical sciences, associate professor. In 2004 he defended his thesis on the topic “Integration of frequency-controlled asynchronous electric drives into automated systems of machine units”. Work experience is 20 years. At present he is an executive

Применение вычислительных методов в прогнозировании тепловой нагрузки

// APPLICATION OF COMPUTATIONAL METHODS IN FORECASTING THE HEAT LOAD //

**Васильев А.В.,
Комсомольский-на-Амуре
государственный университет,
г. Комсомольск-на-Амуре**

В последние годы снижение затрат на энергию и выбросы CO₂ стали основными факторами в управлении на производстве. По этой причине энергетический рынок проявляет все больший интерес к высокоэффективному управлению генерацией на ТЭЦ.

Одним из способов уменьшить негативное воздействие на окружающую среду без ухудшения производительности это внедрение систем управления энергопотреблением: интеллектуальных устройств, способных обеспечить оптимизированный график работы генераторов, используя в качестве входных данных прогнозы нагрузки на следующие дни. Прогнозирование нагрузки на электроэнергию является важной задачей в условиях реструктуризации энергосистемы для успешной торговли мощностью при обмене энергией и хозяйственной деятельности.

В этой работе исследуется применение вычислительных методов,

которые позволяют оценить расход тепловой энергии, вызванную температурой окружающей среды. Где предлагается методика на основе регрессии для создания численных моделей, которые фиксируют взаимосвязь между температурой и расходом тепловой энергии.

Методика успешно проверена на измерениях, полученных на действующей ТЭЦ дальнего востока — Результаты показывают, что методика способна предсказать тепловую реакцию и, следовательно, может помочь в прогнозировании расходов ресурсов.

Ключевые слова: машинное обучение, энергетика, линейная регрессия, алгоритм, модель, электроэнергия.

In recent years, reducing energy costs and CO₂ emissions have become major factors in production management. For this reason, the energy market is showing increasing interest in highly efficient generation management at CHP plants.

One way to reduce the environmental footprint without sacrificing performance is to implement energy management systems: intelligent

devices that can ensure that generators run at an optimized time using forecasts of load for the following days as input. Forecasting the load on electricity is an important task in the context of the restructuring of the power system for successful power trading in energy exchange and business activities.

This paper explores the application of computational methods that allow predicting the consumption of thermal energy, based on the ambient temperature. A regression-based technique is proposed to create numerical models that capture the relationship between temperature and heat energy consumption.

The methodology has been successfully tested on measurements taken at an operating CHPP in the Far East – The results show that the methodology is able to predict the consumption of thermal energy and, therefore, can help in predicting the consumption of resources.

Keywords: machine learning, energy, linear regression, algorithm, model, electricity.

Отрасли энергетики ищут инструменты для прогнозирования нагрузки, чтобы можно было должным образом поддерживать баланс между нагрузкой и генерацией. Прогнозирование нагрузки тепловой мощности необходимо для подбора оптимальных параметров оборудования на ТЭЦ и котельных. Точные системы прогнозирования обеспечивают лучшее понимание динамики существующих энергосистем [1].

Прогнозирование нагрузки по тепловой мощности важно для эффективного обслуживания энер-

госистемы, например, для распределения мощности в сети. Оценка тепловой мощности является критически важной предпосылкой для оптимального распределения мощностей на ТЭЦ. Предприятие могло бы выбрать более экономичную схему использования энергии. Это помогает энергосистеме снизить себестоимость производства тепловой энергии и оптимально использовать ресурсы.

В этой работе были выбраны параметры, которые лучше всего подошли для предсказания тепловой

нагрузки Дальневосточной ТЭЦ, из тех, что собираются системой телемеханике, рассмотрен способ подготовки и проверки данных, а также выбран алгоритм регрессии.

Подготовка данных

Исследовательский анализ данных обеспечит систематический подход к извлечению информации или обобщению важнейших характеристик данных. Он включает в себя множество методов, которые мы должны выполнить, прежде чем применять данные к моделирова-

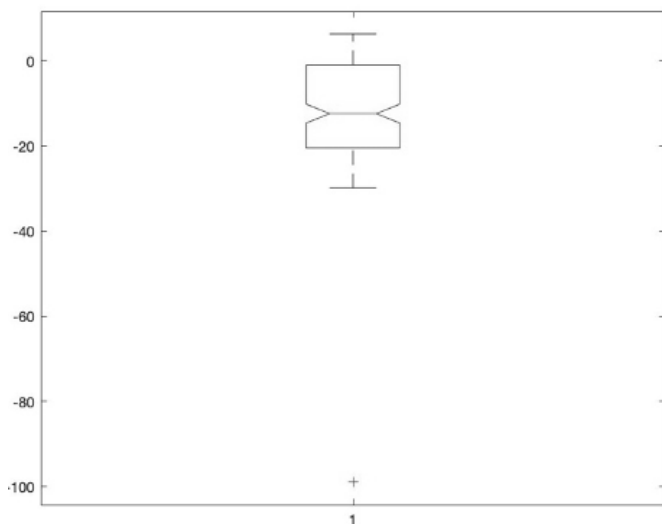


Рис. 1. Блочная диаграмма до обработки выбросов

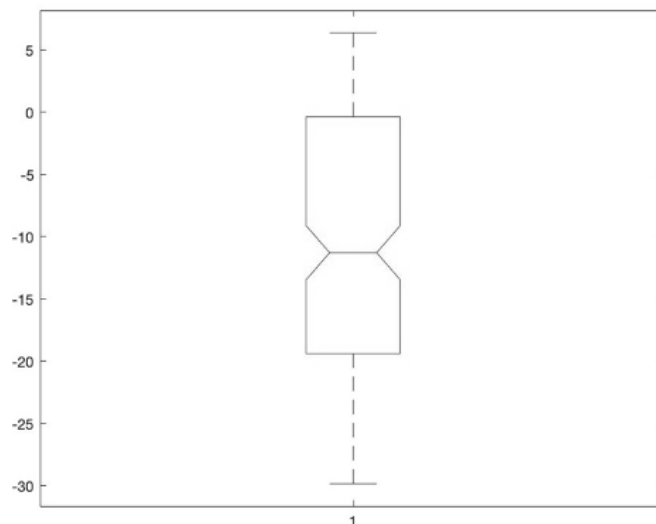


Рис. 2. Блочная диаграмма, после обработки выбросов

нию машинного обучения. Данные, которые мы собираем из разных источников, являются необработанными. Если мы будем использовать такую информацию для моделирования, наша модель машинного обучения покажет высокую неточность. Итак, нам нужно очистить данные, прежде чем применять данные для моделирования машинного обучения.

Сильнее всего негативное влияние на результаты машинного обучения оказывают выбросы. Выброс – это часть данных, которая аномально удалена от других точек. Другими словами, это данные, лежащие за пределами других значений в наборе данных. Таким образом, создание модели машинного обучения без обработки выбросов делает модель предвзятой. Удалив или заменив значение выброса, мы можем стереть выбросы из данных. Однако не рекомендуется удалять какую-либо информацию из метода данных.

Существует много методов, которые мы можем использовать, чтобы найти выбросы в наборе данных. Тем не менее, наиболее популярными методами выявления выбросов являются коробчатая диаграмма. Ниже приведена схема визуализации коробчатой диаграммы на примере собранных системой телемеханики данных дальневосточной ТЭЦ за отопительный период, а именно температуры окружающей среды с шагом 10 минут.

Блочная диаграмма обеспечивает визуализацию сводной статистики

для выборочных данных и содержит следующие функции. Наблюдения за пределами длины усов отмечены как выбросы. По умолчанию выброс – это значение, которое более чем в 1,5 раза превышает межквартирный диапазон от нижней или верхней границы поля. Однако вы можете настроить это значение при помощи дополнительных входных аргументов. Выброс отображается как знак «+».

Мы можем удалить выбросы непосредственно из набора данных. Но удаление – неправильный способ борьбы с ними. Мы можем потерять важную информацию. Для температуры окружающей среды хорошо подойдет алгоритм линейной интерполяции т.к. она изменяется достаточно медленно за небольшие промежутки времени.

Линейная интерполяция – это простейшая форма интерполяции, которая соединяет две точки данных прямой линией. Линейная интерполяция также является Ньютоновской формой полинома первого порядка. Следовательно, отсутствующие значения можно напрямую предсказать с помощью уравнения линейной интерполяции.

Результат замены выбросов на интерполированные значения можно посмотреть на рисунке ниже.

Прогнозирование нагрузки

Существует три основных типа машинного обучения. Первый – обучение с учителем, при таком обучении компьютер учится на разме-

ченных обучающих данных. Вторая форма обучения – это обучение без учителя: обучение без учителя – это когда данные не помечены, а обучение с подкреплением – это когда модель учится сама по себе.

Модели регрессии и модели классификации – это два типа алгоритмов машинного обучения с учителем. Если входные переменные непрерывны, категоричны и дискретны, а выходная переменная непрерывна или дискретна, то модель будет формироваться на основе задачи регрессии [3-4].

В задаче регрессии значения коэффициента корреляции используются для масштабирования признаков. После этого мы можем разделить данные на наборы для обучения и тестирования. Если мы не разделим данные, то будет шанс, что разработанная модель будет необъективной. После этого мы применим подходящий алгоритм машинного обучения. После того, как модель обучена, мы можем прогнозировать записи на одних и тех же данных. В конце посчитаем точность модели. Допустим нас устраивает точность, то без перенастройки модели. В этом случае мы развернем модель для нового прогноза.

Выбор функций машинного обучения направлен на поиск наилучшего набора функций для создания эффективной модели на основе собранных данных. Редко все переменные или функции в наборе данных полезны при создании модели машинного обучения в реальной

жизни. Добавление ненужных переменных снижает потенциал модели, а также может снизить ее общую точность. Добавление в модель все большего количества переменных или атрибутов часто увеличивает общую сложность модели.

Во-первых, мы смотрим на тип данных функции для прогнозирования. Мы применяем стандартные правила или методы для извлечения оптимальных признаков в зависимости от типа данных. Чтобы оценить взаимосвязь между признаками числового типа, мы используем коэффициент корреляции и строим регрессионную модель. Мы обрабатываем категориальные или числовые дискретные данные и выбираем оптимальные признаки, используя алгоритм анализа основных компонентов, дерево решений и алгоритм случайного леса, чтобы выбрать оптимальные признаки задач классификации.

Глядя на значение коэффициента корреляции, мы также можем определить взаимосвязь между переменными [2]. Сила линейной связи между двумя непрерывными переменными рассчитывается с помощью корреляционного анализа.

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{(\sum (x_i - \bar{x})^2) \sum (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (1)$$

где r – коэффициент корреляции; x_i – значения переменной x в выборке; y_i – среднее значение переменной x ; y_i – значения переменной y в выборке; y – среднее значение переменной y .

Значение коэффициента корреляции лежит в пределах от -1 до $+1$. Отрицательная корреляция будет представлена как -1 , а положительная корреляция будет представлена как $+1$. Предположим, что значение коэффициента корреляции больше $0,85$. В этом случае мы говорим, что существует хорошая связь между переменными. Предположим, что значение коэффициента корреляции меньше $0,85$. В этом случае мы делаем вывод, что это плохие отношения. Если значение коэффициента корреляции равно 0 , то между двумя переменными нет связи.

Если значение коэффициента корреляции больше $0,85$ и, если эти переменные являются входными, в таком наборе данных возникает проблема коллинеарности. Если у нас есть проблема коллинеарности между двумя переменными, мы обычно пренебрегаем одной менее значимой переменной. Лучше всего для предсказания температуры подошли такие параметры как температура окружающей среды и месяц.

Были опробованы несколько различных алгоритмов регрессии. Причем стоит отметить, что во время обучения лучше всего себя показала регрессия Гауссовского процесса, но на практике она проигрывала линейной.

Результат обучения модели на данных отопительного периода конца 2019 и начала 2020 года можно увидеть на рисунке ниже.

Сравним результат предсказания с реальным графиком производства

тепловой энергии за отопительный период конца 2020 и начала 2021 года.

Выводы

Аналитические результаты показывают, что предложенная модель регрессии предсказывает нагрузку тепловой мощности с хорошей точностью.

Методика прогнозирования нагрузки с использованием регрессионных моделей может быть применена к другим областям исследования энергосистем, эффективная торговля на энергетическом рынке, регулирование энергосистемы и так далее. Эту работу по прогнозированию нагрузки можно расширить, принимая во внимание последовательные сети, а также будние и выходные дни.

Литература

1. Фархадзаде Э.М. Повышение надежности и экономичности котельных установок блочных электростанций Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики // Минск: БНТУ, 2015. Вып. 66: Актуальные проблемы надежности систем энергетики: материалы Международного семинара имени Ю.Н. Руденко. С. 404–410.

2. Минимизация риска ошибочного решения при оценке значимости статистических связей технико-экономических показателей объектов электроэнергетических систем / Э. М. Фархадзаде, Мурадалиев А. З., Фарзалиев Ю. З., Рафиева

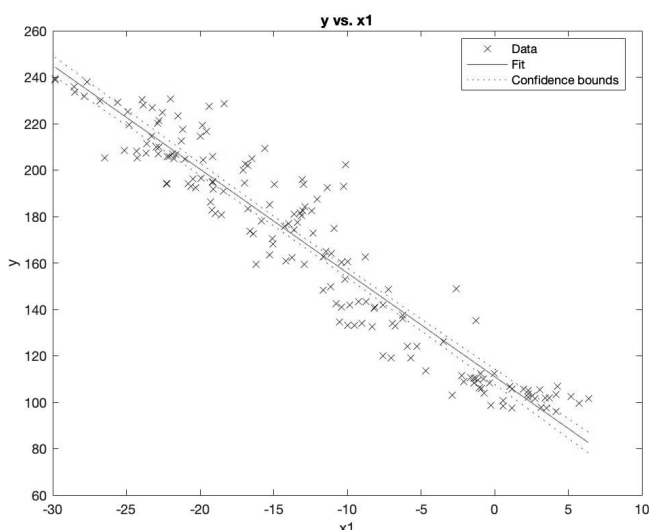


Рис. 3. Результат обучения модели

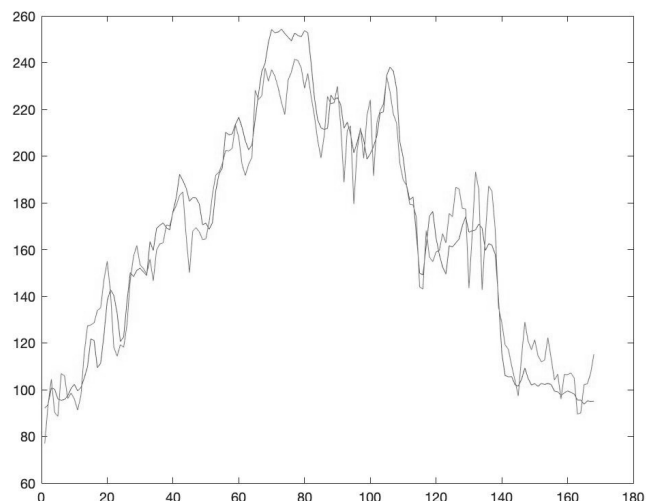


Рис. 4. Сравнение предсказания с реальным значением расхода тепла на ТЭС

Т. К., Абдуллаева С. А. // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2018. №3

3. Носков С.И. Технология моделирования объектов с нестабильным функционированием и неопределенностью в данных // Иркутск: Облформпечать. 1996.

4. Базилевский М.П. Синтез модели парной линейной регрессии и простейшей EIV-модели // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2019;7(1):170-182.

Васильев Александр Владимирович.

Родился в 1991 году. Окончил Комсомольский-на-Амуре государственный университет по специальности (КнАГУ) «Электроника и нанотехника». В настоящее время работает инженером отдела информационных технологий и связи Комсомольской ТЭЦ-2, является аспирантом КнАГУ, тема исследования – «Разработка микрокомпьютерной системы обнаружения несанкционированного проникновения на объект». Автор 4 научных статей и 1 патента.

Vasiliev Alexander.

Was born in 1991. Graduated from the Komsomolsk-on-Amur State University with a degree in Electronics and Nanotechnology (KnAGU). Currently, he works as an engineer of the information technology and communication department of Komsomolskaya CHPP-2, is a postgraduate student of KnASU, the research topic is «Development of a microcomputer system for detecting unauthorized entry into an object». Author of 4 scientific articles and 1 patent.

Структурно-параметрический синтез системы управления ЭТК грузоподъемного механизма

// STRUCTURAL-PARAMETRIC SYNTHESIS OF THE CONTROL SYSTEM OF THE ELECTRICAL COMPLEX OF THE LIFTING MECHANISM //

**Доманов В.И., к.т.н.,
Ульяновский государственный
технический университет,
г. Ульяновск**

**Мурзаков Д.Г.,
Ульяновский государственный
технический университет,
г. Ульяновск**

Выполнен структурный синтез системы управления асинхронным двигателем с фазным ротором входящего в состав электротехнического комплекса (ЭТК) грузоподъемного механизма. Определены основные элементы системы управления. Разработана компьютерная модель позволяющая оценить переходные процессы. Выполнен расчет корректирующих звеньев системы подчинённого регулирования (регуляторов скорости и момента) обеспечивающих требуемые характеристики. При решении постав-

ленных задач применяются методы компьютерного моделирования, реализованные в среде динамического моделирования SimInTech, теория автоматического управления и теория электропривода. Предложенная структура двухканального управления АДФР обеспечивает безударный переход от номинальной частоты вращения в режим удержания, тем самым обеспечивает выполнение требования минимизации рывков грузоподъемного механизма.

Ключевые слова: асинхронный двигатель с фазным ротором, грузоподъемный механизм, режим удержания, подчинённое регулирование, модель АДФР, дифференциальный сельсин, двойное питание.

The structural synthesis of an induction motor with a wound rotor control system of the lifting mechanism included in the electrotechnical complex (ETC) is carried out. The main elements

of the control system are defined. A computer model has been developed to evaluate transients. The calculation of the corrective links of the subordinate control system (speed and torque regulators) providing the required characteristics is performed. When solving the tasks, computer modeling methods implemented in the SimInTech dynamic modeling environment, the theory of automatic control and the theory of electric drive are used. The proposed structure of the two-channel WRIM control provides a shock-free transition from the nominal speed to the holding mode, thereby ensuring that the requirements for minimizing jerks of the lifting mechanism are met.

Keywords: wound rotor induction motor, lifting mechanism, holding mode, subordinate regulation, WRIM model, differential selsyns, dual power supply.

По условиям работы электропривода ГПМ должен быть регулируемым с ограничением рывка (ускорения) груза [1]. Эти условия в большинстве случаев обеспечиваются многоскоростностью (переключение секций сопротивлений в

роторной цепи) или существенным снижением скорости вертикального перемещения. Это приводит к снижению производительности работы такого электропривода.

Электроприводы ГПМ в большинстве случаев, с момента их

производства оборудованы асинхронными двигателями с фазным ротором и имеют устаревшие системы управления.

Предлагаемая схема управления АДФР (рис. 1) содержит два преобразователя, в цепи ротора и статора и позволяет обеспечить указанные условия работы ГПМ. Схемы преобразователя рассматривалась в работе [2]. Основное преимущество схемы заключается в создании режима удержания. Он обеспечивает безударную остановку и пуск электропривода в отличие от применения электромеханического тормоза.

где U_{YS} , U_{YR} – напряжения управления по цепям статора и ротора, $W_{IP,S}$, $W_{IP,R}$ – передаточные функции преобразователей в цепях статора и ротора,

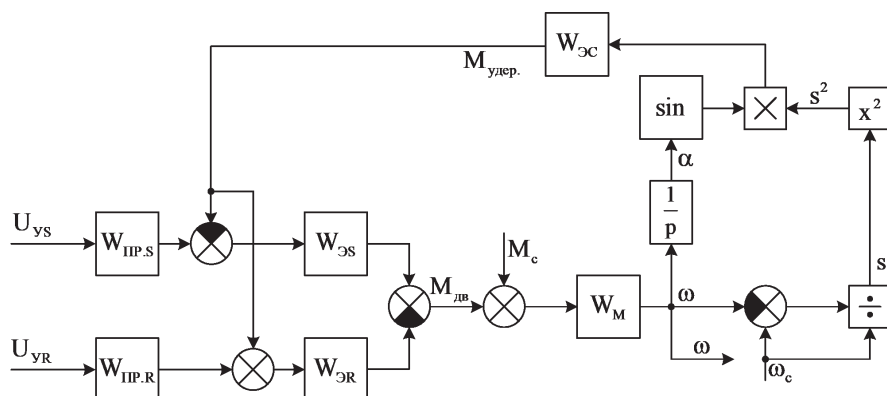


Рис. 1. Структурная схема реверсивного АДФР

$W_{\Sigma S}, W_{\Sigma R}$ – передаточные функции электромеханических звеньев в цепях статора и ротора,

W_M – передаточная функция механической части двигателя,

$$M_{удер.} = W_{\Sigma C} \cdot s^2 \cdot \sin \left[\frac{\omega}{p} \right] \text{ – МОМЕНТ}$$

удержания,

$W_{\Sigma C}$ – передаточная функция электромеханического формирования момента,

s – скольжение.

Передаточные функции звеньев:

$$W_{\Sigma S}(p) \approx \frac{K_S(T_S p + 1)}{T_{\Sigma} p + 1},$$

$$W_{\Sigma R}(p) \approx \frac{K_R(T_R p + 1)}{T_{\Sigma} p + 1},$$

где $T_{\Sigma} = T_S + T_R$,

$$W_M(p) \approx \frac{1/Jp}{1 + K_{TP}/Jp} = \frac{K_M}{T_M p + 1},$$

где $K_M = \frac{1}{K_{TP}}$, $T_M = \frac{J}{K_{TP}}$.

Из структурной схемы (рис. 1) видно, что момент удержания пропорционален квадрату скольжения. Поэтому при $M_{удер.} = 0$, и при $\omega = \omega_c$. Эксперимент, проведенный на АДФР, показал, что нагрузка (и момент удержания) влияют на ток статора или ротора в зависимости от знака.

В работе [3] получена структурная схема АДФР при управлении по цепи ротора. Считаем, что для реверса двигателя используется аналогичный преобразователь в цепи статора. Кроме того, необходимо учесть влияние момента удержания. В результате этого структурная схема реверсивного электропривода на основе АДФР примет вид (рис. 2), где

W_S, PM_R – регуляторы момента в цепях статора и ротора,

W_S – регулятор скорости,

$K_{OC.MS}, K_{OC.MR}$ – коэффициенты обратных связей по моменту (выпрямленному току) статора и ротора,

K_{OCC} – коэффициент обратной связи по скорости.

Синтез параметров ЭТК грузоподъемного механизма

В настоящее время большинство регулируемых общепромышленных

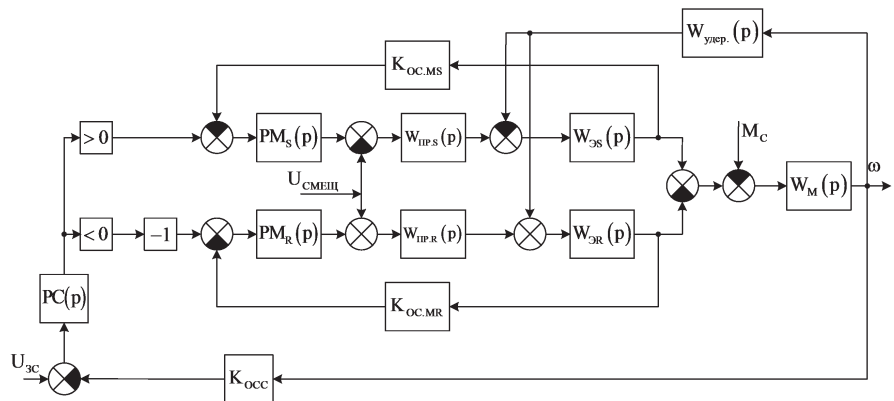


Рис. 2. Структурная схема реверсивного электропривода на основе АДФР

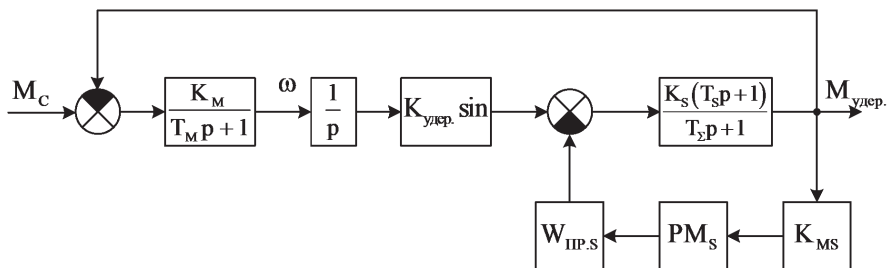


Рис. 3. Структурная схема электропривода в режиме удержания

электроприводов строятся по структуре подчиненного регулирования [4-6]. Предлагаемый электропривод ГПМ можно построить по этой схеме (рис. 2).

Однако наличие существенно различных режимов (регулирование скорости и удержание) требуют использования дополнительных узлов для обеспечения требуемых режимов работы.

В режиме удержания и равны номинальному значению, при этом угловая частота двигателя равна нулю. Принимаем что . При таких допущения структурная схема (рис. 2) упрощается и принимает вид

Без учета регуляторов момента статора передаточная функция

$$W_{M.удер.}(p) = \frac{M_{удер.}(p)}{M_C(p)}$$

будет иметь

$$W_{M.удер.}(p) = \frac{K_M \cdot \frac{1}{p} \cdot K_{удер.} \cdot \frac{K_S(T_S p + 1)}{T_{\Sigma} p + 1}}{1 + \frac{K_M}{T_M p + 1} \cdot \frac{1}{p} \cdot K_{удер.} \cdot \frac{K_S(T_S p + 1)}{T_{\Sigma} p + 1}} = \frac{K_M K_{удер.} K_S (T_S p + 1)}{(T_M p + 1) p (T_{\Sigma} p + 1) + K_M K_{удер.} K_S (T_S p + 1)}$$

Характеристическое уравнение имеет вид $(T_M p + 1) p (T_{\Sigma} p + 1) + K_M K_{удер.} K_S (T_S p + 1) = 0$ и после упрощения получаем

$$\frac{T_M + T_{\Sigma}}{K} p^2 + \frac{1 + K T_S}{K} p + 1 = 0, \text{ где } \bar{K} = K_M K_{удер.} K_S.$$

Из полученного можно определить коэффициент демпфирования

$$\xi = \frac{1 + K T_S}{2\sqrt{(T_M + T_{\Sigma})\bar{K}}} \quad (1)$$

Для устранения колебаний необходимо соблюдение условия $\xi \leq 1$.

Анализ выражения (1) показывает что одним из возможных путей снижения коэффициента демпфирования ξ является снижение \bar{K} , этого можно достичь увеличение $K_{PM.S}$. В статическом режиме ($p = 0$) с учетом

$$W_{PM.S} = K_{PM.S}, K'_S = \frac{K_S}{1 + K_S K_{IP} K_{PM.S}}$$

Основным требованием к системе управления ГПМ являются: минимизация рывков (ускорения) и достижение максимальной производительности. Первое требование может быть реализовано за счет достижения апериодичности процесса и обеспечения режима удержания при выключении электромагнитного тормоза. Второе требование обеспечивается расширением диапазона регулирования. Для достижения апериодичности переходного процесса можно выбрать желаемую передаточную функцию контуров

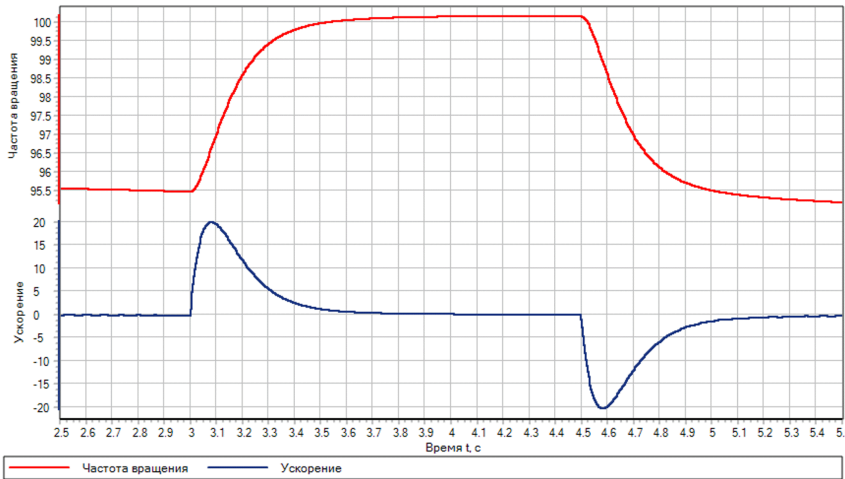


Рис. 4. График переходных процессов при приращении частоты вращения на 5%

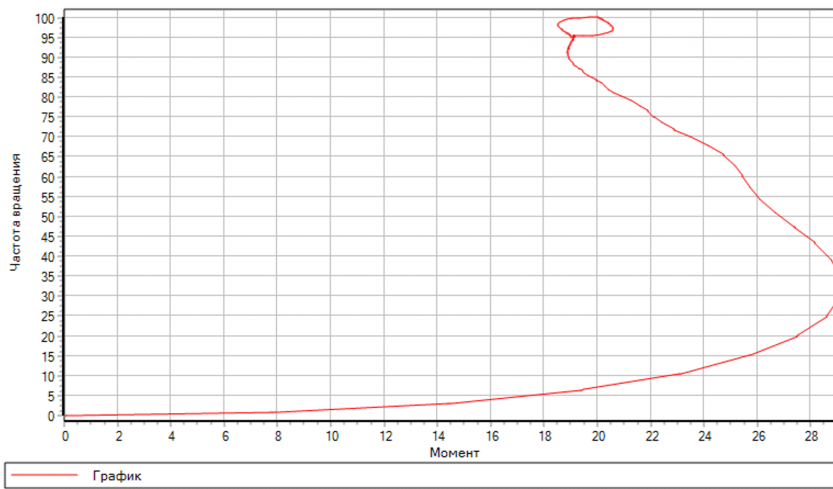


Рис. 5. Механические характеристики при пуске и изменении частоты вращения

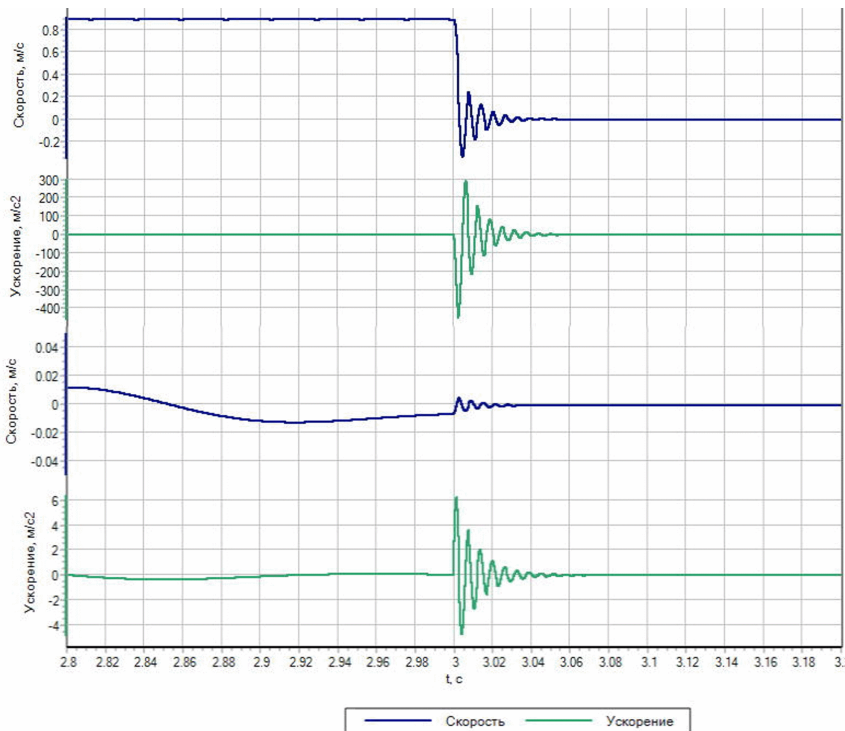


Рис. 6. Скорость и ускорение груза в случае включения тормоза не регулируемого ЭП (1 и 2 график) и в ЭП с реализацией режима удержания привода (3 и 4 график)

момента статора и ротора следующего вида

$$W_{Pж.м} = \frac{1}{2T_{\mu 1} p (0.5T_{\mu} p + 1)} \quad (2)$$

при этом показатель колебательности $\zeta = 1$, T_{μ} – малая постоянная времени.

Найдена передаточная функция регулятора момента исходя из выражения (2)

$$W_{PM}(p) = \frac{T_{\Sigma} p + 1}{4T_{IP} K_{IP} K_{\Sigma} K_{OCM} p (T_{\Sigma} p + 1)} \quad (3)$$

Она может быть реализованы ПИ регулятором с апериодическим фильтром.

Аналогично была выполнена настройка контура скорости

$$W_{PC}(p) = \frac{(T_M p + 1) K_{OCM}}{16T_{IP} K_{OCC} K_M p} \quad (4)$$

Она реализуется на основе ПИ регулятора.

На рис. 4 приведены результаты компьютерного моделирования электропривода ГПМ с полученными настройками подтверждающие апериодичность процессов в среде SimInTech [7].

Механические характеристики АДФР при пуске и изменении скорости на 5% приведены на рис. 5.

Проведя компьютерное моделирование электротехнического комплекса ГПМ получены графики переходных процессов скорости перемещения груза и его ускорение (рис. 6). Первый и второй графики (рис. 6) соответствуют режиму наложения электромагнитного тормоза в момент времени 3с в нерегулируемом ЭП, третий и четвертый графики соответствуют переходу в режим удержания и последующим наложением тормоза.

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- предлагаемая схема на основе АДФР обеспечивает регулирование, реверс и режим удержания;
- выполнен расчет регуляторов координат, обеспечивающий апериодический переходный процесс;
- использование режима удержания позволяет снизить значение рывка в 49 раз.

Литература

1. Елисеев В.А., Шинянский А.В. Справочник по автоматизированному электроприводу. М.: Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.

2. Исследование работы асинхронного двигателя по упрощенной схеме двойного питания. Доманов В.И., Доманов А.В., Мурзаков Д.Г. // Периодический научно-технический журнал «Электроника и электрооборудование транспорта» («ЭЭТ»). 2018. №2. С. 35-37.

3. Математическая модель асинхронного двигателя с фазным ротором в системе координат d-q. Доманов В.И., Мурзаков Д.Г., Халиулов Д.С. // Вопросы электротехнологии. 2021. №3.

4. Шенфельд Р., Хабигер Э. Автоматизированные электроприводы. Ленинград: Энергоатомиздат, 1985г. – 464с.

5. Фролов Ю.М., Шелякин В.П. Регулируемый асинхронный электропривод: Учебное пособие / Ю.М. Фролов, В.П. Шелякин. – СПб.: Лань, 2018. – 464 с.

6. Москаленко, В.В. Системы автоматизированного управления электропривода / В.В. Москаленко. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2016. – 208 с.

7. Хабаров, С. П. Основы моделирования технических систем. Средства Simintech: учебное пособие / С. П. Хабаров, М. Л. Шилкина. – Санкт-Пе-

тербург: Лань, 2019. – 120 с.

Доманов Виктор Иванович

Родился в 1950 году. Окончил в 1972 году 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 154 научных труда, автор 16 изобретений.

Мурзаков Дмитрий Геннадьевич

Родился в 1992 году. Окончил в 2014 году Ульяновский государственный технический университет по специальности «Электропривод и автоматика промышленных установок и ТК». 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 Technical University. He has 154 scientific publications, author of 15 inventions.

Murzakov Dmitrij

Was born in 1992. In 2014 he graduated from Ulyanovsk State Technical University specializing in « Electric drives and automation of industrial installations ». Postgraduate of the of Department «Electric drives and automation of industrial installations» in Ulyanovsk State Technical University. He has published articles in the field of electrical engineering.