

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

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

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

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

Главный редактор:
А.Г. Бабак, к.т.н.

Редакционный совет:

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

Выпускающий редактор:
Н.А. Климчук.

Редакция:

140070, Московская область,
Люберецкий район, п. Томилино,
ул. Гаршина, д. 11.
Тел./факс: (495) 500-40-20,
(495) 557-23-95
E-mail: npptez@mail.ru
Сайт: www.npptez.ru

Подписано в печать:
___.10.2016 г.

Отпечатано:

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

Формат 60x90/8,
бумага мелованная, объем 7 п.л.,
тираж 1000 экз., заказ 1275

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

Попов Ю.В.

Развитие бортовых устройств регистраторов для воздушных судов.
Часть 2 2

Киселев А.А., Михайлов Ю.А., Нестерцев И.А.

Совершенствование грозозащиты пунктов питания цепей
управления железнодорожных путей 6

Ютт В.Е., Голубчик Т.В., Гулямов К.Х.

Экспериментальное исследование режимов работы
импульсных преобразователей постоянного напряжения
трехфазной структуры при активной и активно-индуктивной нагрузках 11

Панченко Ю.В., Курбатов В.С., Макаров С.В.

К практическому применению управляемого компенсатора жесткости
на неодимовых магнитах 15

Ким К.К., Ткачук А.А.

Трехфазный трансформатор со стабилизирующими свойствами 18

МЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ, ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

Денисов И.В., Смирнов А.А.

Методика диагностирования электромеханического усилителя
рулевого управления безредукторного типа 22

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

Расчет и анализ схемы наблюдателя скорости двигателя постоянного тока 25

Красовский А.Б.

Определение положений коммутации вентильно-индукторного двигателя
при регулировании среднего значения момента в зоне низких скоростей 28

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

Аполлонский С.М., Горский А.Н.

Методы анализа электромагнитной совместимости 33

Косарев А.Б., Косарев Б.И.

Электромагнитная совместимость электроустановок
и сетей непрямого электроснабжения с электрифицированными
железными дорогами переменного тока 39

ИНФОРМАЦИЯ

Краснов Л.А.

Об изменении патентных и иных пошлин 45

Краснов Л.А.

О несоответствии положений Правил подачи возражений и заявлений
и их рассмотрения в Палате по патентным спорам Роспатента
действующему законодательству 46

Краснов Л.А.

О правилах закрепления исключительного права на результат
интеллектуальной деятельности, созданный по государственному контракту
до 1 января 2008 года 47

Развитие бортовых устройств регистраторов для воздушных судов. Часть 2

// Development of onboard devices of registrars for aircraft. Part 2 //

**Попов Ю.В., д.т. н.,
Научно-исследовательский центр
Центрального научно-исследовательского института ВВС МО,
г. Люберцы**

*Во второй части статьи рассмотрены результаты создания бортовых регистраторов звуковой и видеoinформации. Представлены характеристики бортовых регистраторов звуковой и видеoinформации. Рассмотрены системы обработки зарегистрированной информации. Изложены материалы по спасаемым защищенным бортовым накопителям.
Ключевые слова: бортовой регистратор звуковой, видеорегистратор, спасаемые защищенные накопители информации, обработка информации.*

Звуковые бортовые регистраторы

Звуковые бортовые регистраторы записывают переговоры членов экипажа, переговоры с диспетчером и акустическую обстановку в кабине экипажа. Звуковые бортовые регистраторы (ЗБР) по принципу записи разделяются на два вида: с магнитным принципом записи и с электронным принципом записи. ЗБР с магнитным принципом записи делятся на одноканальные и четырехканальные регистраторы. В качестве одноканальных ЗБР используются самолетный магнитофон МС-61 (МС-61Б) и бортовой магнитофон П-503Б (БЗ, БС). К четырехканальным ЗБР относятся бортовое средство сбора звуковой информации МАРС-БМ и бортовой магнитофон П-507-ЗБС. Современные ЗБР с электронным принципом записи проектируются с учетом международных требований TSO-C123a, Cockpit Voice Recorder Systems.

Одноканальные ЗБР с магнитным принципом записи, самолетный магнитофон МС-61 (МС-61Б) и бортовой магнитофон П-503Б (БЗ, БС) предназначены для записи речи и звуковых сигналов из различных систем (АРК, РВ, РСБН и др.).

*In the second part of article, results of creation of onboard registrars sound and a video information are considered. Characteristics of onboard registrars sound and a video information are presented. Systems of processing of the registered information are considered. Materials on the rescued protected onboard stores are stated.
Keywords: the onboard registrar sound, the video registrar, the rescued protected stores of the information, information processing.*

В комплект магнитофона входят самолетный магнитофон, предназначенный для записи звуковых сигналов; выключатель питания (включается перед полетом); переключатель проверки с сигнальной лампой, предназначенные для проведения самоконтроля (рис. 1). МС-61 и П-503 представляют собой запишающую часть магнитофона.



Рис. 1. Самолетный магнитофон.

Запись производится непрерывно на проволоку диаметром 0,05 мм марки

ЭИ-708А с автоматическим стиранием предыдущей записи. Тактико-технические данные одноканальных БРЗ приведены в таблице 1.

Воспроизводить запись можно только на земле с помощью наземного магнитофона МН-61 (рис. 2).



Рис. 2. Наземный магнитофон МН-61.

Бортовое средство сбора звуковой информации МАРС-БМ и бортовой магнитофон П-507-ЗБС обеспечивают непрерывную запись по четырем каналам:

- по первым трем каналам – речевой информации в диапазоне 300–3400 Гц;
- по четвертому каналу – импульсной информации закодированного времени.

Первые два канала имеют три входа для записи служебных переговоров между членами экипажа ВС, между членами экипажей различных ВС, между членами экипажа ВС и наземными диспетчерскими пунктами. Третий канал предназначен для записи звуковой обстановки в кабине ВС. Импульсная информация коди-

Таблица 1. Тактико-технические данные.

Технические данные	МС-61	П-503
Длительность записи	5,5 часа	9 часов
Скорость движения звуконосителя	150 мм/сек	100 мм/сек
Напряжение питания	28,5 В	28,5 В
Реверс лентопротяжного механизма	Нет	Есть
Отношение «Сигнал/помеха» канала записи-воспроизведения	Не менее 30 Дб	Не менее 30 Дб

рованного времени, которая регистрируется по четвертому каналу, предназначена для синхронизации записанной речевой информации с данными параметров полета, зарегистрированными параметрическим регистратором.

В бортовом средстве сбора звуковой информации МАРС-БМ и бортовом магнитофоне П-507-ЗБС в качестве носителя информации используется магнитная лента шириной 6,25 мм. Данные устройства обеспечивают непрерывную запись речевой и импульсной информации с ее сохранением за последнее время работы, которое составляет не менее 30 мин. Для обеспечения непрерывной записи в этих устройствах выбран челночный вариант лентопротяжного механизма, то есть запись ведется при движении магнитной ленты в двух направлениях. Для этого используются один 8-дорожечный блок универсальных магнитных головок (МГ 2) и два 4-дорожечных блока магнитных головок стирания (МГ 1 и МГ 3), которые подключаются поочередно в зависимости от направления движения магнитной ленты. Подключается тот блок головок стирания, который расположен перед блоком универсальных головок по ходу движения ленты. Смена направления вращения электродвигателя (реверс) осуществляется автоматически, при подходе ленты к любому концу рабочего участка. В данных устройствах предусмотрен режим воспроизведения для прослушивания записанных данных на борту ВС. На рис. 3 приведен внешний вид системы МАРС-БМ.



Рис. 3. Внешний вид системы МАРС-БМ.

Для воспроизведения зарегистрированной информации магнитная лента снимается из бортового устройства записи и устанавливается на наземное устройство воспроизведения и прослушивания записанных переговоров (рис. 4).

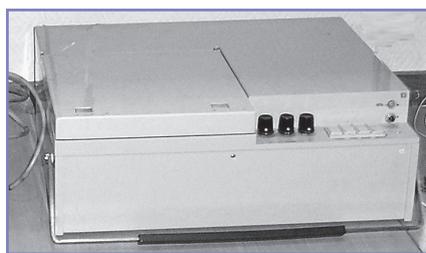


Рис. 4. Устройство воспроизведения и прослушивания переговоров.

БРЗ с электронным принципом записи обеспечивает прием и преобразование аналоговой речевой и звуковой информации в цифровую форму. На рис. 5

представлен внешний вид современных БРЗ с электронным принципом записи. Информация поступает по трем речевым каналам от радиосредств ВС. БРЗ обеспечивает прием кода текущего бортового времени для последующей синхронизации записываемой звуковой и речевой информации с данными параметров полета, зарегистрированными бортовой системой сбора параметрической информации, при наземной обработке.

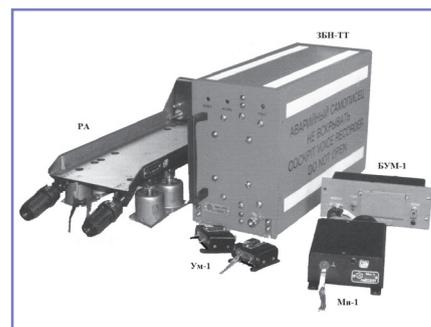


Рис. 5. Внешний вид БРЗ с электронным принципом записи.

БРЗ обеспечивает непрерывную регистрацию речевой и звуковой информации совместно с кодом времени в режиме записи по «кольцу» в защищенный модуль памяти системы не менее чем за последние два часа работы.

БРЗ позволяет копирование записанной информации на наземное устройство воспроизведения. Информация при считывании сохраняется. Копирование зарегистрированной информации может осуществляться как при снятом с борта ВС блоке БРЗ, так и на борту ВС.

Таблица 2. Основные характеристики БРЗ.

Тип БРЗ	Год разработки или применения	Принцип записи	Вид записи	Носитель информации	Количество каналов записи	Время сохраняемой записи
Самолетный магнитофон МС-61. Завод «Вильма», г. Вильнюс	1961	Магнитный	Аналоговый	Проволока типов ЭИ-708 и ЭИ-708А	1	5,5 часа (реверса нет)
Магнитофон бортовой П-503Б (БЗ, БС). Завод «Вильма», г. Вильнюс	1965	Магнитный	Аналоговый	Проволока типов ЭИ-708 и ЭИ-708А	1	11 часов с реверсом
Бортовой магнитофон П-507-ЗБС. ОАО НИИ «Электромеханических приборов», г. Киев	1996	Магнитный	Аналоговый	Лавсановая магнитная лента	4	3 часа
Бортовое средство сбора звуковой информации МАРС-БМ. Завод «Вильма», г. Вильнюс	1984	Магнитный	Аналоговый	Лавсановая магнитная лента	4	30 мин
РЗБН-1. НПО «Прибор», г. Санкт-Петербург	2000	Электронный	Цифровой	Флэш-память	4	2 часа
П-503М. Завод им. Г. И. Петровского, г. Нижний Новгород	2002	Электронный	Цифровой	Флэш-память	5	12 часов
П-507М. Завод им. Г. И. Петровского, г. Нижний Новгород	2004	Электронный	Цифровой	Флэш-память	5	12 часов

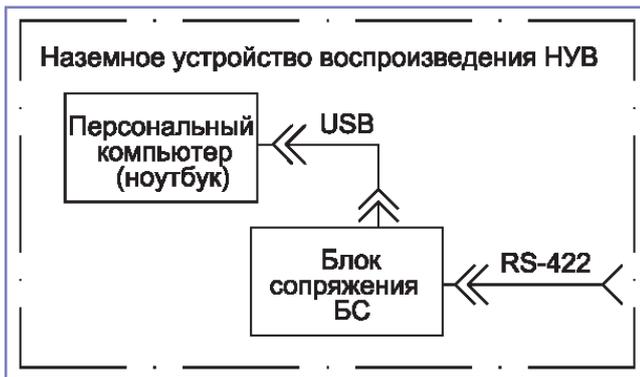


Рис. 6. Структурная схема наземного устройства воспроизведения звуковой информации.

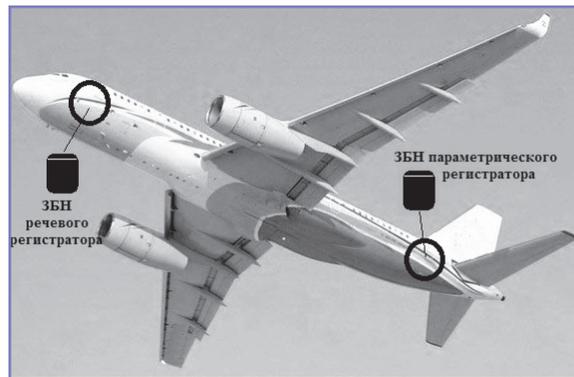


Рис. 7. Размещение защищенных бортовых накопителей на борту воздушного судна.

Наземное устройство воспроизведения состоит из персонального компьютера и блока сопряжения (рис. 6).

В таблице 2 приведены данные БРЗ, которые установлены на ВС.

Бортовые регистраторы параметрической и звуковой информации в своем составе имеют защищенные бортовые накопители (ЗБН). Для сохранения зарегистрированной информации защищенный бортовой накопитель должен устанавливаться таким образом, чтобы снизить до минимума вероятность разрушения контейнера в результате удара при аварии и повреждения его от пожара. В настоящее время для сохранения зарегистрированной информации ЗБН звукового регистратора устанавливают в носовой части ВС, а ЗБН параметрического регистратора – в хвостовой части ВС (рис. 7).

С появлением совмещенных регистраторов, которые регистрируют параметрическую и звуковую информацию в один ЗБН, ИКАО рекомендует устанавливать на ВС два ЗБН: один – в носовой части, другой – в хвостовой части ВС.

Видеорегистраторы

Важнейшую роль в обеспечении полета современного ВС играет авионика. Прогресс в развитии авионики во многом определяет уровень безопасности полетов. В последние годы для регистрации обстановки в кабине ВС предполагается использование видеорегистраторов.

Начало XXI века проходит под эгидой повсеместного внедрения на современные самолеты видеорегистраторов. В настоящее время наступило понимание того, что параметрический и звуковой регистраторы не могут в полном объеме решить задачу по расследованию авиационного происшествия.

Видеорегистраторы фиксируют обстановку в кабине экипажа. Видеозапись



Рис. 8. Методы фиксации обстановки в кабине экипажа.

при расследовании авиационного происшествия необходима в тех случаях, когда важно запечатлеть какое-либо действие и показания приборов (МФИ), существенные для установления истинной причины, динамику развития события или явления вместе с сопровождающими их звуками. В последние годы особенно интенсивно совершенствуются цифровые методы фиксации информации, которые используются в видеорегистраторе. Видеорегистраторы классифицируются по методам фиксации обстановки в кабине экипажа (рис. 8).

Съемка обстановки в кабине экипажа цифровой видеокамерой является статичной. При размещении камеры в кабине экипажа необходимо, чтобы кадр, фиксируемый при съемке, строился по принципу равновесия и рационального распределения в кадре объектов по смысловой нагрузке. Фиксируемый композиционный кадр должен обеспечивать удобство восприятия расследователем данного кадра.

Принцип действия видеосъемки состоит в том, что изображение запечатлеваемой обстановки в кабине экипажа трансформируется в электрический сигнал, который записывается в цифровом виде на флэш-память видеорегистратора. Сигнал не нуждается в дополнитель-

ной обработке, а для воспроизведения изображения на мониторе необходимо лишь обратное преобразование. Электронные цифровые методы, которые применяются в видеорегистраторе, имеют одну важную особенность, которая состоит в том, что их можно отнести к фотографическим. Данные методы обеспечивают не только вывод изображения на монитор, но и его воспроизведение на жесткой (бумажной) основе.

Современные цифровые методы позволяют получить изображения более высокого качества, чем цветные фотографии, полученные фотоаппаратами с высокой разрешающей способностью.

Программа видеозаписи действий на МФИ аналогична программам видеозаписи действий на экране компьютера. Программа конвертирует полученный

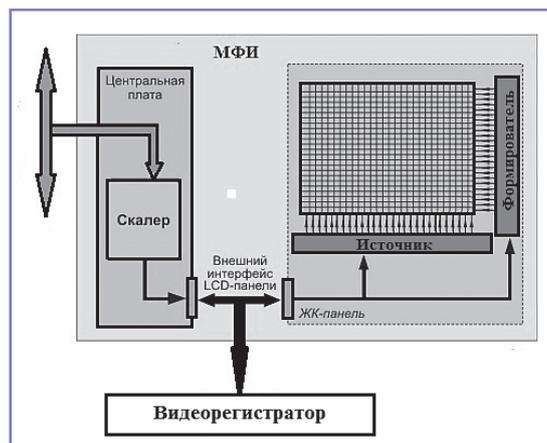


Рис. 9. Общая архитектура МФИ видеорегистраторов.

видеокадр в формат AVI и осуществляет его запись в память регистратора. Данный видеоклип можно воспроизводить на экране любого компьютера.

МФИ становятся основными устройствами воспроизведения информации в кабине экипажа, а это значит, что их применение на ВС носит массовый характер. На рис. 9 приведена общая архитектура МФИ [1].

Сигналы с информацией, которую необходимо отобразить на МФИ, приходят на вход МФИ с сетевой шины ВС. Эти сигналы обрабатываются графическим контроллером монитора, получившим название скалер. Скалер осуществляет преобразование изображения, масштабируя его в формат, соответствующий разрешению матрицы МФИ. Таким образом, данные, передаваемые на МФИ, формируются на основной (микросхемной) плате монитора, а именно – на выходе микросхемы скалера, и передаются на панель с использованием соответствующего интерфейса (рис. 9). Эти сигналы интерфейса представляют значительный практический интерес для специалистов, которые занимаются расследованием АП. По этим сигналам можно восстановить информацию, которую наблюдал экипаж в полете. Использование видеозаписи при расследовании позволяет в динамике фиксировать образную и звуковую значимую информацию.

Спасаемые защищенные бортовые накопители

После катастрофы самолета A330 Air France над Атлантикой, произошедшей 1 июня 2009 года, первый бортовой регистратор был обнаружен и поднят на поверхность для обработки зарегистрированной информации 1 мая 2011 года, второй – 3 мая. Бортовые регистраторы находились на глубине океана 3,4–3,8 км. С самолетом Boeing 777–200ER авиакомпании Malaysia Airlines 8 марта 2014 года была потеряна связь. В момент исчезновения самолет находился над Южно-Китайским морем. Предпринимаемые попытки найти обломки ВС и бортовые регистраторы не увенчались успехом. Авиационные катастрофы с ВС, которые произошли над акваторией, показали необходимость оснащать ВС спасаемыми ЗБН.

Спасаемыми ЗБН оснащены военные самолеты и вертолеты морского базирования, разработанные в нашей стране. Опыт АП с ВС, которые были оборудованы спасаемыми ЗБН, показывает, что

оперативное обнаружение ЗБН и места катастрофы позволяет своевременно принять меры по спасению экипажа.

Спасаемые ЗБН отделяются от ВС при попадании в воду и, находясь на водной поверхности, указывают радиомаркированием точные координаты своего местоположения. Накопители такого типа после отделения обеспечивают положительную плавучесть в водной среде в течение 30 суток. Радиомаркирование осуществляется на частотах 121,5/243 МГц, что дает возможность их обнаружения на расстоянии 20 км с плавсредств и 75 км – с борта ВС.

Двадцатилетняя эксплуатация спасаемых ЗБН в нашей стране показала их надежность и стопроцентное сохранение зарегистрированной информации.

К сожалению, тип таких регистраторов в нормах ИКАО [2] не прописан для гражданских ВС. В этом виноваты наши специалисты, которые входят в группу по разработке положений ИКАО. Они слабо ориентируются в развитии наших систем регистрации. В связи с запуском ВС заграничного производства в наших авиакомпаниях они больше внимания уделяют зарубежным системам регистрации. Когда приходило на согласование Приложение 6 [2], раздел «6.3. Бортовые самописцы», автором были внесены положения о спасаемых регистраторах (в это время автор работал в Межгосударственном авиационном комитете), но вышестоящие лица решили не предлагать данные изменения.

За рубежом занимались разработкой спасаемых ЗБН, но, потерпев неудачу, прекратили и решили для поиска устанавливать радиомаяк, который должен включаться при попадании в воду и работать 30 дней. Но случай с самолетом A330 Air France потребовал изменить это требование. В Приложении 6 [2], в разделе «Добавление 9. Бортовые самописцы», появилась следующая формулировка.

1.1. Контейнеры бортовых самописцев:

.

.

.

с) оснащаются надежно подсоединенным и автоматически приводимым в действие устройством, обеспечивающим обнаружение их под водой и работающим на частоте 37,5 кГц. Как можно скорее, но не позднее 1 января 2018 года. Минимальное время работы этих устройств составляет 90 дней.

Этот факт свидетельствует, что поиск и спасение накопителей информации остаются одной из главных задач после АП над акваторией. И наши предложения об установке на борт ВС спасаемых ЗБН были бы приняты членами ИКАО, если учесть, что современные спасаемые ЗБН весят около 7 кг, тогда как современные ВС в зависимости от модификации имеют взлетную массу 150–164 тонн.

Литература

1. Внешние интерфейсы TFT панелей. Часть I. <http://mirpu.ru/>.
2. Эксплуатация воздушных судов. Приложение 6. Часть 1: Международный коммерческий воздушный транспорт. Самолеты. Международная организация гражданской авиации: Издание, девятое. Июль 2010. – 260 с.

Попов Юрий Васильевич

Родился в 1954 году. В 1977 году окончил Киевское высшее инженерное авиационное военное училище по специальности «Автоматическое, электро- и приборное оборудование пилотируемых летательных аппаратов», в 1987 году – Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова по специальности «Прикладная математика». Доктор технических наук, имеет научное звание старшего научного сотрудника. В 2005 году защитил диссертацию по теме «Теоретические и методические основы сохранения информации бортовых устройств регистрации при авиационных происшествиях». Опыт работы – 39 лет. В настоящее время работает старшим научным сотрудником в Научно-исследовательском институте (г. Люберцы) Центрального научно-исследовательского института ВВС МО. Имеет более 290 научных трудов, 15 авторских свидетельств и патентов.

Popov Yuri

He was born in 1954. In 1977 he graduated from Kiev Higher Engineering Aviation Military School majoring in «Automatic, electrical and instrumental equipment of piloted aircraft» and in 1987 he graduated Moscow State University majoring in «Applied mathematics». He is Doctor of engineering, he has academic rank of Senior Researcher. In 2005 he defended the thesis, the topic of thesis is «Theoretical and methodical bases of information safety onboard devices of registration at aviation incidents». He has 39 years of work experience. At present he works as Senior Researcher at Scientific Research Institute (Lubertsy) of Central Research Institute of Air Defense. He has more than 290 scientific papers, 15 certificates of authorship and patents.

Совершенствование грозозащиты пунктов питания цепей управления железнодорожных путей

// Improvement of the lightning protection of railway electronics devices //

Киселев А.А., Михайлов Ю.А., к.т. н.,
Нестерцев И.А.,
СПБГОУ ПГУПС, г. Санкт-Петербург

Число грозовых повреждений и помех в цепях сигнализации и управления движением железнодорожных составов может быть снижено за счет уменьшения числа срабатываний разрядников, защищающих трансформаторы питания этих цепей от грозовых перенапряжений. Срабатывание разрядников сопровождается импульсами напряжения на корпусе трансформатора, передающимися на сторону низкого напряжения и способными вызвать отказы в работе питаемых цепей. С помощью моделирования процесса развития грозовых перенапряжений получены статистические оценки числа срабатываний разрядников и амплитуд импульсов тока через разрядник. Количественно определена эффективность установки дополнительных разрядников на опорах, соседних с местом подключения трансформатора, для снижения повторяемости и амплитуд грозовых импульсов в цепях, питающих устройства сигнализации и управления.

Ключевые слова: цепи питания электронных схем, грозозащита, разрядники, железнодорожные цепи управления.

Питание шкафов цепей сигнализации и дистанционного управления движением на железной дороге осуществляется через понижающие трансформаторы 10/0,25 кВ, установленные непосредственно на опорах, поддерживающих контактные провода железнодорожного пути, либо поблизости от них. Для защиты трансформаторов от волн грозовых перенапряжений непосредственно на корпусе трансформатора или вблизи от него устанавливаются вентильные разрядники. Согласно Правилам устройства электроустановок сопротивление R_3 заземления опор, на которых установлены грозозащитные устройства, может до-

The number of lightning damages and interferences in signal and control railway circuits can be reduced by decreasing the number of arrester operations that protects power supply transformers of these circuits from lightning surges. The operation is accompanied by a voltage pulses on the transformer tank transmitted to the low-voltage circuits and able to cause their failure. The number of arrester operations and current pulses through the arrester were estimated by means of modeling of lightning waves in high voltage net. Quantified the efficiency of extra arresters on poles, adjacent to the transformer destination, in order to reduce the frequency and lightning pulse amplitudes in the circuits feeding the signal and control devices.

Keywords: nets of electronic schemes feeding, lightning protection, arresters, railway control nets.

стигать 20 Ом. Срабатывание разрядника сопровождается импульсом напряжения на заземлении R_3 , которое частично передается на заземленный корпус трансформатора. Поскольку один из выводов низковольтной обмотки, питающей цепи управления, имеет потенциал корпуса, импульс грозового перенапряжения передается в цепь питания устройств автоматики. Установка защитных устройств в низковольтной цепи, как показывает опыт эксплуатации, не всегда способна предотвратить повреждения оборудования от этих воздействий.

Повышение надежности грозозащиты трансформатора 10 кВ достигается

путем замены вентильных разрядников на нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН), имеющие лучшие защитные характеристики. Однако при этом увеличиваются среднегодовое число срабатываний этих устройств и величина токов срабатывания, что утяжеляет требования к защитным устройствам на стороне низкого напряжения и приводит к росту числа отказов оборудования, подключенного к обмотке 0,25 кВ.

Одними из возможных мер повышения надежности грозозащиты промежуточных пунктов питания являются снижение числа срабатываний разрядника, установленного возле трансформатора, и снижение амплитуд импульсов тока разрядника. Этого можно достичь путем установки дополнительных разрядников на соседних опорах, перехватывающих грозовые волны на пути к защищаемому трансформатору. Для оценки эффективности такого мероприятия требуется определить статистическое распределение амплитуд и повторяемости грозовых волн, приходящих в точку подключения трансформатора от ударов молнии в различные участки линии 10 кВ. Эти характеристики зависят от числа и места ударов молнии в линию, от случайной величины амплитуды тока молнии при каждом ударе, а также от параметров линии и грозозащитных устройств. Анализу повторяемости грозовых поражений линий электропередачи и возникающих при этом перенапряжений посвящено большое количество работ. Установлено, что существенную роль в определении числа опасных грозовых воздействий играет учет затухания грозовых волн при пробеге от места удара молнии до защищаемого объекта. Аналитические расчеты этих процессов весьма громоздки вследствие нелинейности процессов, связанных с расходом энергии волн за счет импульсной короны на проводах линии и потерь в земле, а также необходимости учета возмож-

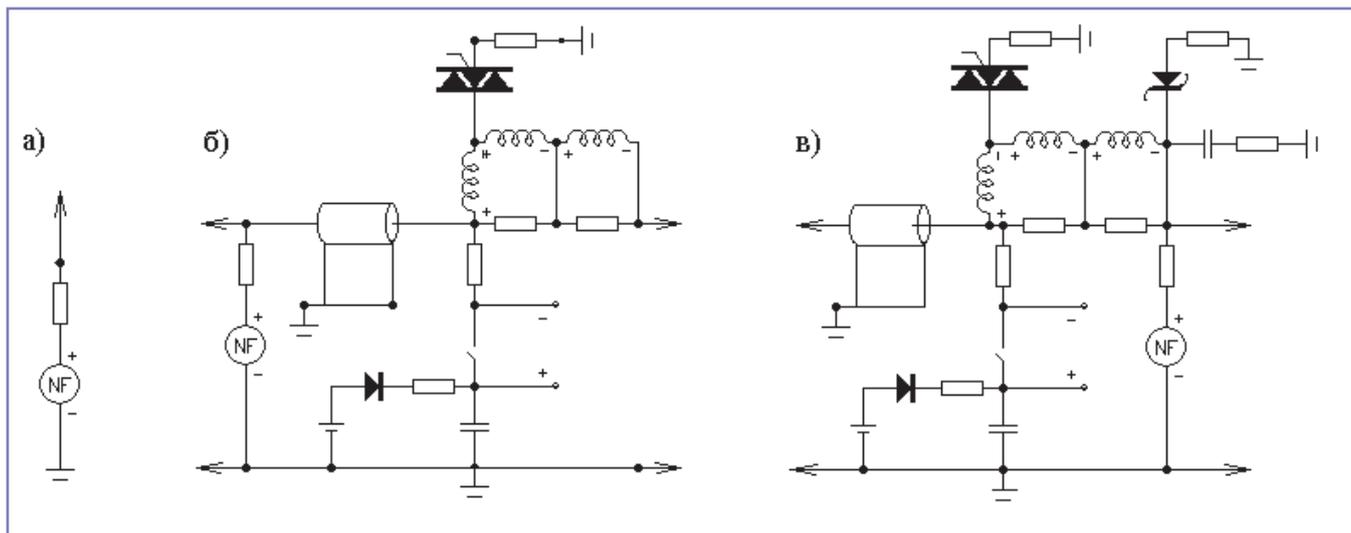


Рис. 1. Элементы модели пути грозовых волн:

а) модель канала молнии, б) модель промежуточной ячейки линии,

в) модель ячейки линии с установленным трансформатором и грозозащитным разрядником.

ных перекрытий линейной изоляции при пробеге волны по линии [1].

В данной работе для поиска способов усиления защиты железнодорожной автоматики использовались компьютерные модели участков сети, в которых происходят развитие и распространение волн грозовых разрядов. Компьютерное моделирование позволило более точно воспроизвести процесс развития грозовых перенапряжений с учетом характеристик самого грозового разряда, линии, по которой происходит распространение грозовых волн, и защитных устройств. В результате получены количественные оценки эффективности предлагаемых мер защиты.

Расчетная схема сети включает три блока:

- блок, моделирующий канал молнии и путь тока по пораженной молнией опоре с разрядным промежутком, учитывающим возможность перекрытия линейной изоляции;

- эквивалентную схему участка воздушной линии от места удара молнии до защищаемого объекта с моделями искровых промежутков, учитывающих вероятность перекрытия линейной изоляции, моделями импульсной короны на проводах линии и моделями частотно-зависимых сопротивлений, учитывающих потери в земле;

- модель опоры, где расположены трансформатор и защитный разрядник, с их сопротивлениями заземления.

Эти блоки представлены на рис. 1.

Рис. 1а представляет схему источника тока молнии. Генератор NF задает ам-

плитуду и форму тока молнии. Генератор настроен на форму стандартной волны тока молнии 1,2/50 мкс. Амплитуда тока молнии I_M варьируется в пределах от 5 до 150 кА. Эквивалентное сопротивление канала главной стадии разряда молнии принято (с учетом диапазона токов молнии от 30 до 60 кА) равным 580 Ом. Величина импульсного сопротивления заземления $R_{зи}$ опор принята равной 20 Ом, индуктивность $L_{он}$ пути тока молнии по опоре и спуску до заземлителя – 6 мкГн.

Распределение вероятности превышения амплитуды тока молнии I_M при первом импульсе принято, согласно рекомендации МЭК, в соответствии с формулой

$$P(I_M) = \int_0^{\lg(I_M)} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-(\lg I_M - \lg I_M \text{ ср})^2 \frac{1}{2\sigma^2}\right) d(\lg I_M),$$

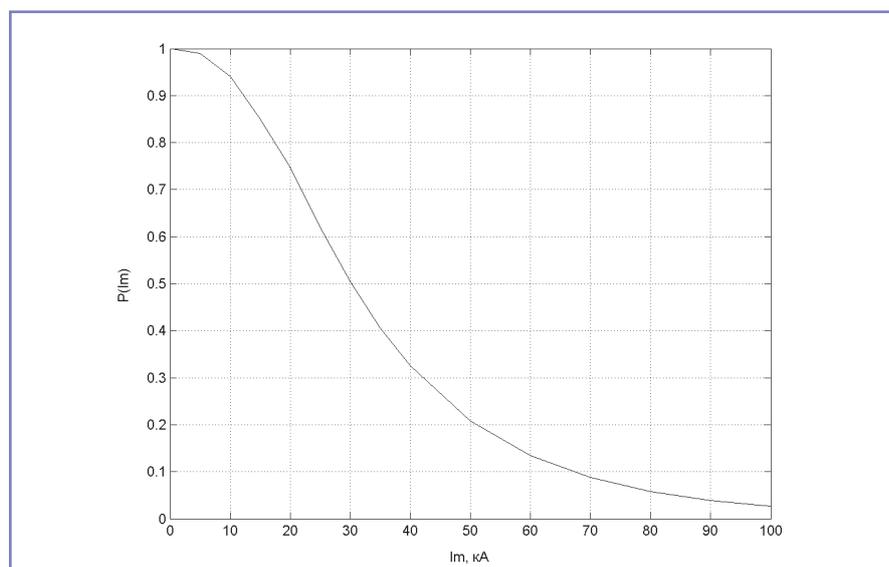


Рис. 2. Распределение вероятности $P(I_M)$ превышения током I_M заданного значения.

где $\lg I_M \text{ ср} = 1,48$ – среднее значение логарифма амплитуды тока молнии в первом импульсе; $\sigma = 0,27$ – стандарт отклонения величины $\lg I_M$ при первом импульсе. График этой зависимости показан на рис. 2.

Длительность фронта импульса тока молнии принималась равной 1,2 мкс, длительность полуспада – 50 мкс. Влияние крутизны тока молнии в данном расчете не учитывалось ввиду малых времен перекрытия изоляции.

На рис. 1б изображена схема одной ячейки модели линии, соответствующей одному пролету длиной 100 м. С учетом невысокой электрической прочности линейной изоляции принято, что в точке

удара молнии происходит перекрытие всех трех фаз, и волна напряжения движется по каналу «Три фазных провода – земля». Волновое сопротивление канала Z_{λ} рассчитано в соответствии с маркой фазных проводов и геометрией их подвески и принято равным 507 Ом (при отсутствии короны на проводах). В начале каждой ячейки подключена эквивалентная схема канала молнии, активируемая при рассмотрении удара молнии в данную точку. В конце каждой ячейки линии подключаются элементы, моделирующие влияние на движение волн: а) импульсной короны на проводах линии; б) частотной зависимости сопротивления земли; в) разрядного промежутка фазных изоляторов, а также индуктивности и активного сопротивления пути тока разряда на землю. Разрядный промежуток гирлянды моделируется тиристором, замыкающим линию на сопротивление заземления опоры при подъеме напряжения линии до импульсного разрядного напряжения изолятора ПФ-6а при импульсе 1,2/50 мкс. Масштабы тока и напряжения в модели приняты равными 1:1000. Зависящие от формы импульса тока потери в земле учитываются, согласно рекомендации [4], цепочкой из активных сопротивлений, шунтированных индуктивностями. Постоянные времени этих контуров выбраны так, чтобы учесть частотную зависимость потерь в сопротивлении земли. При возникновении короны на проводах к ячейке линии подключается дополнительная емкость C_d , имитирующая емкость чехла короны. Емкость C_d считается нелинейно зависящей от напряжения u на проводе. Зависимость $C_d(U_{пр})$ заимствована из [2]:

$$C_d = dq/dt = C^* I_{пр}^* ((0.625 * (u/U_{кр} - 1)^{2/3}),$$

где $l_{пр}$ = 100 м – длина пролета линии, моделируемого одной ячейкой; $U_{кр}$ = 185 кВ – напряжение начала короны на проводах линии; u – мгновенное значение напряжения на линии.

На рис. 1в представлена схема размещения опоры, на которой установлен трансформатор и грозозащитный разрядник со своим сопротивлением заземления. Трансформатор замещен входной емкостью присоединения, состоящего из самого трансформатора, защитного разрядника и коммутирующих аппаратов. Разрядник замещен опорным диодом, напряжение срабатывания которого и остающееся напряжение по-

добраны в соответствии с характеристиками разрядника типа РВП-10. Предварительными опытами установлено, что грозовые разряды на удалении более 1 км от опоры с трансформатором не приводят к опасным перенапряжениям, поэтому детально рассматривались поражения молнией участков линии только на первых десяти пролетах,ходящих от трансформатора. Остальные участки линии замещались активным сопротивлением, равным волновому сопротивлению канала движения волны. Принималось, что прямые удары молнии в провода линии на удалении не больше половины пролета от ближайшей опоры равносильны ударам молнии непосредственно в эту опору.

Расчет среднегодового числа срабатываний разрядника на опоре с трансформатором и амплитуд тока в этом разряднике I_p проводился в соответствии с методикой, изложенной в [3]. Последовательно рассматривались последствия ударов молнии в каждую из 10 опор линии, начиная с опоры, где установлен разрядник. Для каждой опоры последовательно рассматривались удары молнии с амплитудами тока I_m , равными 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 и 100 кА. При каждом ударе по осциллограмме измерялась амплитуда тока разрядника I_p . Затем подсчитывалось количество случаев попадания амплитуд тока разрядника I_p в заданные интервалы его значений: от 0 до 1 кА; от 1 до 2 кА; от 2 до 3 кА; от 3 до 4 кА; от 4 до 6 кА; от 6 до 8 кА; от 8 до 10 кА; от 10 до 15 кА; от 15 до 20 кА и от 20 до 30 кА. Расчет проводился для длительности периода работы линии 1000 лет. При этом для каждого случая срабатывания разрядника учитывалась вероят-

ность превышения того тока молнии, при котором произошло данное срабатывание. По данным, полученным для каждой опоры, определялось общее для всех опор число срабатываний разрядника за 1000 лет работы с амплитудами тока I_p , попадающими в указанные выше интервалы. При суммировании учитывалась возможность прихода волн с пролетов, расположенных как слева, так и справа от опоры с разрядником. Расчет ожидаемого числа прямых ударов молнии в линию с высотой подвески проводов h_{cp} при среднем числе ударов молнии в 1 км² земной поверхности $n^* = 6.7$ в течение $n_{гроз.ч} = 40$ грозовых часов проводился по формуле, рекомендованной в [4]: $n_{100} = 0.08 * n_{гроз.ч} * h_{cp} = 0.08 * 40 * 10 = 32$ удара в год на 100 км длины линии ежегодно, что соответствует 32 ударам молнии на один пролет длиной 100 м за 1000 лет наблюдения.

Доли опасных волн от ударов в разные пролеты будут различаться вследствие разного затухания волны по мере удлинения пути пробега до защищаемой опоры. Кроме того, влияют наличие или отсутствие перекрытий изоляторов линии при пробеге волны мимо каждой из опор, а также отражение волн от мест перекрытия. На рис. 3 приведены в качестве примера кривые импульсов напряжения (в случае отсутствия перекрытий изоляторов и срабатывания разрядников) при ударе молнии $I_m = 8$ кА на разных удалениях от места удара. На рис. 4 для сравнения показана деформация волн при наличии перекрытия гирлянд изоляторов.

Исходные данные для расчета приведены в таблице 1. Для оценки эффективности установки дополнительных

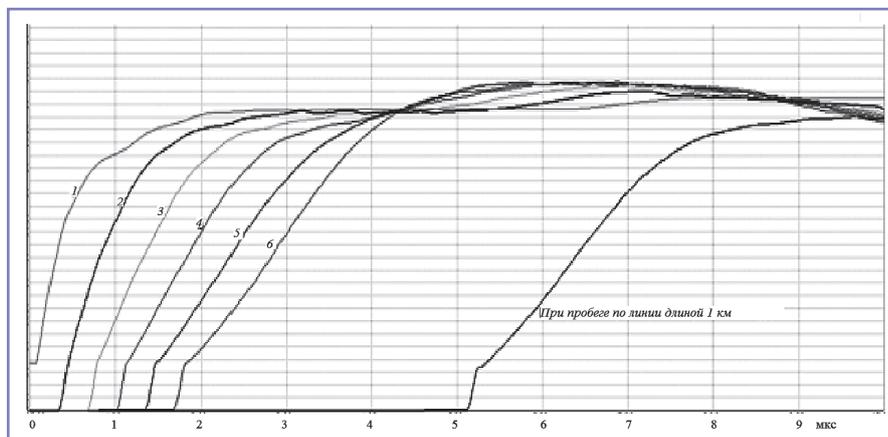


Рис. 3. Импульсы грозового напряжения на опорах с номерами, указанными на графике, при ударе молнии в шестую от места установки трансформатора опору. Амплитуда тока молнии $I_m = 8$ кА.

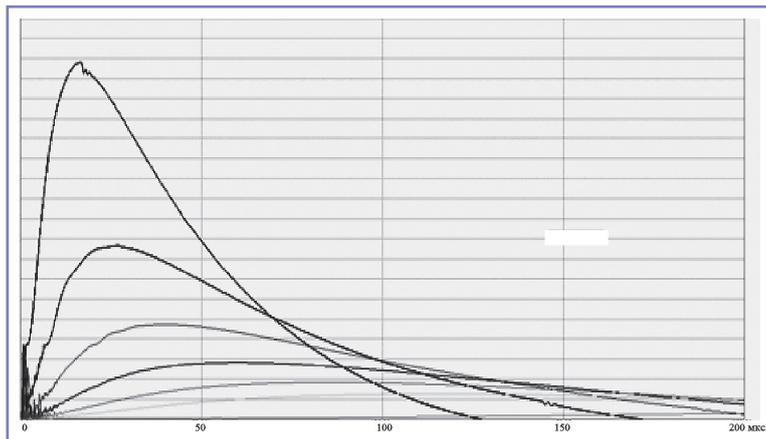


Рис. 4. Импульсы грозового напряжения на опорах, расположенных на расстоянии 100 (1), 200 (2), 300 (3), 400 (4) и 500 (5) метров от места удара молнии с учетом перекрытия изоляторов. Амплитуда тока молнии – 150 кА.

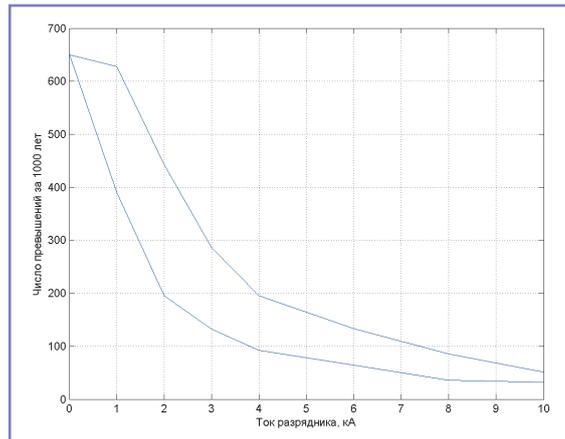


Рис. 5. Число превышений заданного значения I_p в течение 1000 лет.

разрядников результаты расчета сопоставлялись с аналогичными расчетами в схеме, дополненной моделями разрядников, расположенных на двух соседних опорах. В таблице 2 приведены значения числа токов разрядника в разных интервалах его значений при одном

разряднике и при установке трех разрядников. Число превышений заданного значения тока разрядника за 1000 лет в схеме с одним и в схеме с тремя разрядниками приведено в таблице 3.

На рис. 5 построены интегральные кривые числа превышений заданного

уровня амплитуды тока разрядника, расположенного рядом с трансформатором, при отсутствии и при наличии двух дополнительных разрядников на соседних опорах.

Верхняя кривая – в схеме с одним разрядником, нижняя – в схеме с тремя разрядниками.

Таблица 1. Исходные данные для расчета параметров модели линии 10 кВ.

Наименование параметра	Обозначение	Единица измерения	Величина
Номинальное напряжение линии	$U_{ном}$	кВ	10
Расчетный радиус провода	$r_{пр}$	м	$6,9 \cdot 10^{-3}$
Высота подвески верхнего провода на опоре	$h_{пр}$	м	10
Средняя высота подвески проводов	$h_{ср}$	м	8
Длина линии	l_l	км	30
Длина пролета	$l_{пр}$	м	100
Число грозových часов в году на трассе ЛЭП	$T_{гр.ч.}$	час	40
Напряжение начала общей короны	$U_{кр}$	кВ	185
Импульсное разрядное напряжение изолятора ПФ-6А при импульсе 1.2/50 мкс	$U_{пр.имп.}$	кВ	130
Пробивное напряжение разрядника	$U_{разр}$	кВ	35
Остающееся напряжение при токе 5 кА	$U_{ост}$	кВ	40

Таблица 2. Количество импульсов тока основного разрядника в разных интервалах его значений при единственном разряднике в схеме и при установке двух дополнительных разрядников.

Интервалы значений токов разрядника I_p , кА	0.0–1.0	1.0–2.0	2.0–3.0	3.0–4.0	4.0–5.0	6.0–8.0	8.0–10.0	10.0–20.0	20.0–30.0	30.0–50.0	>50
Число I_p в заданном интервале при одном разряднике	652	390	195	132	92.0	64.1	36.1	32.3	21.5	13.8	4.33
Число I_p в заданном интервале при трех разрядниках	650	628	442	286	196	133	85.3	51.1	30	13.3	4.33

Таблица 3. Число превышений заданного значения тока основного разрядника за 1000 лет эксплуатации в схеме с одним и в схеме с тремя разрядниками.

Значения токов разрядника I_p , кА	0.0	1.0	2.0	3.0	4.0	6.0	8.0	10.0	20.0	30.0	>50
Число превышений I_p за 1000 лет при одном разряднике	21.7	185	156	90.7	62.9	47.5	34.2	21.1	12.6	17.3	4.33
Число превышений I_p за 1000 лет при трех разрядниках	262	195	63	40.4	27.9	27.9	3.78	10.8	7.74	9.46	4.33

рядников, однако при наличии последних существенно сокращается длительность импульса тока I_p . При этом уменьшение выделяемой в разряднике энергии снижает риск разрушения разрядника и тем самым повышает надежность электрооборудования схем автоматики.

3. В случае установки дополнительных разрядников амплитуды тока I_p больше 15 кА практически возникают только при ударах молнии непосредственно в опору, на которой установлен разрядник. Существенное повышение надежности грозозащиты трансформатора и питающегося от него оборудования можно обеспечить установкой возле трансформатора одиночного стержневого молниеотвода, перехватывающего грозовые разряды непосредственно в опору с трансформатором. Такая защита практически исключит возможность появления в разряднике, установленном рядом с трансформатором, токов, превышающих 15 кА.

Литература

1. Базуткин В.В., Кадомская К.П., Костенко М.В., Михайлов Ю.А. Перенапряжения в электрических системах и защита от них. СПб.: Энергоатомиздат. 1995, – 320 с.
2. Ефимов Б.В. Грозовые волны в воздушных

линиях. Апатиты: Кольский научный центр РАН. 2000, 134 с.

3. Костенко М.В., Богатенков И.М., Михайлов Ю.А., Халилов Ф.Х. Итоги науки и техники. Серия «Электрические станции и сети». М.: ВИНТИ, 1987, 109 с.

4. Корсунцев А.В., Новикова А.Н. Методические вопросы расчета грозоупорности воздушных линий электропередачи. Сборник докладов «Грозозащита в районах с высоким удельным сопротивлением грунта». Апатиты, КФАН СССР, 1981, с. 19.

5. Костенко М.В., Ефимов Б.В., Зархи И.М., Гумерова Н.И. Анализ надежности грозозащиты подстанций. Л.: «Наука», 1981. 128 с.

Киселев Александр Александрович

Родился в 1995 году. В настоящее время является студентом 4 курса кафедры «Электрическая тяга» ПГУПС.

Михайлов Юрий Александрович

Родился в 1935 году. В 1953 году окончил Ленинградский политехнический институт по специальности «Техника высоких напряжений». Кандидат технических наук, доцент. В 1967 году защитил диссертацию по теме «Исследование статистических характеристик внутренних перенапряжений, воздействующих в эксплуатации на оборудование подстанций 110–500 кВ». Опыт работы –

62 года. Имеет свыше 100 научных публикаций и патентов.

Нестерцев Иван Андреевич

Родился в 1994 году. В настоящее время является студентом 5 курса кафедры «Электрическая тяга» ПГУПС.

Kiselev Alexander

He was born in 1995. At present he is 4 year student of «Electric traction» department of Emperor Alexander I St. Petersburg State University of Transport.

Mikhailov Yuriy

He was born in 1935. In 1953 he graduated from Leningrad Polytechnic University majoring in «High voltage equipment». He is candidate of technical science, associate professor. In 1967 he defended the thesis, the topic of thesis is «Statistical characteristics research of internal overvoltage acting in operation of 110–500 kW substations equipment». He has 62 years of work experience. He has more than 100 scientific publications and patents.

Nestertsev Ivan

He was born in 1994. At present he is 5 year student of «Electric traction» department of Emperor Alexander I St. Petersburg State University of Transport.

Экспериментальное исследование режимов работы импульсных преобразователей постоянного напряжения трехфазной структуры при активной и активно-индуктивной нагрузках

// Experimental study of the modes of dc-dc converters three-phase structure of the active and active-inductive loads //

Ютт В.Е., д.т. н., профессор,
Голубчик Т.В., к.т. н., доцент,
Гулямов К.Х.,

Московский автомобильно-дорожный государственный
технический университет (МАДИ), г. Москва

В данной статье продемонстрированы экспериментальные исследования переходных режимов импульсных преобразователей постоянного напряжения с трехфазной структурой при активной и активно-индуктивной нагрузках. Показаны влияния активной и активно-индуктивной нагрузок на характеристики преобразователя постоянного напряжения и качества переходных процессов. Экспериментальные исследования были проведены посредством имитационного моделирования при помощи пакетов программ, предназначенных для исследования динамических систем.
Ключевые слова: преобразователь напряжения, индуктивная нагрузка, электропривод, многофазный преобразователь, dc-dc конвертеры.

С развитием силовых электроприводов, питающихся от автономных источников питания, появилась необходимость применения преобразователей электрической энергии различных типов и назначения. Одними из них являются импульсные преобразователи постоянного напряжения большой мощности. В данной статье представлена конструкция повышающего преобразователя постоянного напряжения (ППН) и исследованы переходные процессы при различных характерах нагрузки (активной и реактивной). Преимуществом данного преобразователя по сравнению с другими, например, однофазной структуры, является увеличение мощности преобразования с наименьшими потерями, а также уменьшение пульсации напряжения и тока на нагрузке [1, 2].

In this paper, experimental investigations demonstrated transient mode dc-dc converters with a three-phase structure with active and active-inductive loads. Showing the influence of active and active-inductive load on the characteristics of dc-dc converter and the quality of transients. Experimental investigations have been carried out by means of simulation using the software packages intended for the investigation of dynamic systems.

Keywords: voltage converter, inductive load, electric drives, multi-phase converter, dc-dc converters.

вательное устройство, состоящее из n параллельно работающих идентичных составных преобразователей, одинаковых по всем параметрам.

Данный повышающий преобразователь работает по принципу чередования фаз, то есть переключение катушек индуктивностей $L1-L3$ происходит поочередно при помощи силовых ключей $VT1...VT3$ (рис. 1).

Режимы работы каждого составного преобразователя отличаются сдвигом по фазе, который можно определить согласно выражению

$$\varphi_{сд} = \frac{2\pi}{n}, \quad (1)$$

где n – число параллельно работающих преобразователей.

Поскольку в схеме, показанной на рис. 1, количество составных преобра-

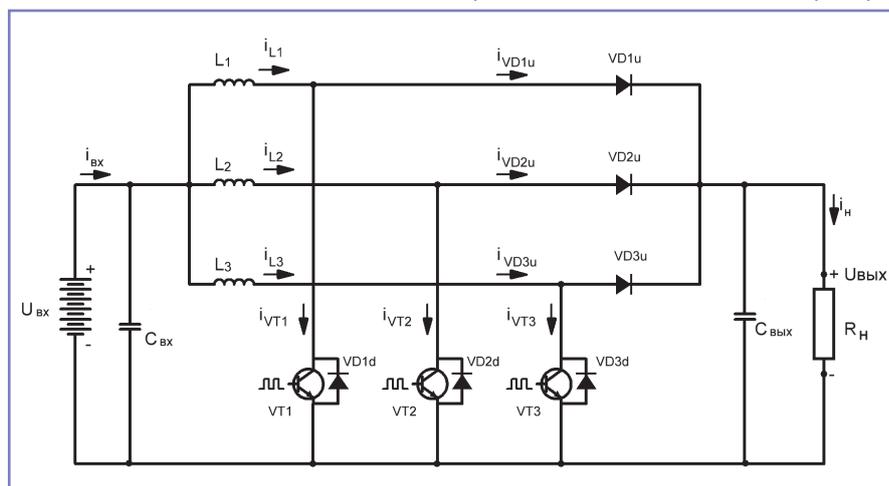


Рис. 1. Повышающий преобразователь постоянного напряжения трехфазной структуры.

Принципы многофазового преобразования напряжения постоянного тока применением каскадных схем с чередованием фаз

Под многофазным преобразователем постоянного напряжения с чередованием фаз понимается преобразо-

вателей равно трем, то фазовый сдвиг, согласно выражению (1), равен 120° [3].

Несмотря на сложность системы управления, совместная работа нескольких составных преобразователей (рис. 1) обеспечивает значительное снижение токовых нагрузок на силовых ключах, поскольку общая нагрузка рав-

номерно распределяется на количество составных преобразователей n [4, 5].

Ток нагрузки для схемы на рис. 1 определяется суммарным током индуктивностей:

$$I_{L\Sigma} = I_{L1} + I_{L2} + I_{L3}. \quad (2)$$

С увеличением количества составных преобразователей частота выходного тока в n раз выше частоты работы транзисторов, а амплитуда пульсации во столько же раз меньше по сравнению с однофазным (одномодульным) преобразователем. Это, во-первых, уменьшает потери мощности переключения, возникающие при высоких рабочих частотах в ключевых транзисторах. Во-вторых, чем выше суммарная частота, тем лучше сглаживается выходное напряжение [6].

Другим достоинством многофазных (каскадных) преобразователей постоянного напряжения является снижение массы фильтрующих элементов, мощность которых главным образом зависит от амплитуды пульсации выходного напряжения [7].

Расчет основных параметров трехфазного повышающего преобразователя постоянного напряжения

Для расчета основных параметров трехфазного преобразователя, показанного на рис. 1, составлена таблица исходных данных входных и выходных

параметров преобразователя. Определение основных параметров состоит из расчета индуктивностей катушек $L1-L3$, емкости конденсатора фильтра $C_{\text{вых}}$ при заданной частоте преобразования f и определения периода такта T_T с временем импульсов $t_{\text{и}}$, $t_{\text{п}}$ для системы управления.

Расчет основных параметров ППН с трехфазным чередованием производится по следующей методике.

Коэффициент заполнения импульсов:

$$D = 1 - (U_{\text{вх}}/U_{\text{вых}}). \quad (3)$$

Полная индуктивность катушек преобразователя:

$$L_{\text{п}} = \frac{U_{\text{вх}}(U_{\text{вых}} - U_{\text{вх}})}{\Delta I_L f U_{\text{вых}}}, \quad (4)$$

где ΔI_L – пульсация тока катушки, которую приблизительно можно рассчитать по формуле

$$\Delta I_L = (0,2-0,4)I_{\text{вых(max)}}(U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}). \quad (5)$$

Индуктивность одной катушки для трехфазной схемы преобразования определяется как отношение полной индуктивности к числу фаз (модулей) преобразователя:

$$L_1 = L_{\text{п}}/3. \quad (6)$$

Уточненный расчет индуктивности одной катушки определяется согласно уравнению

$$L_{1y} = U_{\text{вых}}/4fn\Delta I_{\text{вх.max}}, \quad (7)$$

где f – частота преобразования, определяется как отношение суммарной частоты (из таблицы 1) к числу фаз (модулей) преобразователя:

$$f = f_{\text{сумм}}/3. \quad (8)$$

Минимальная емкость выходного конденсатора фильтра определяется по следующему выражению:

$$C_{\text{вых.min}} = I_{\text{вых(max)}}(1-D)/f\Delta U_{\text{вых}}. \quad (9)$$

Период такта определяется как

$$T_T = 1/f_{\text{сумм}}. \quad (10)$$

Период импульса:

$$T_{\text{и}} = T_T/3. \quad (11)$$

Время импульса:

$$t_{\text{и}} = TD. \quad (12)$$

Время паузы:

$$t_{\text{п}} = (1 - D)T. \quad (13)$$

Время импульса и паузы считается оптимальным при выполнении следующего условия:

$$U_{\text{вх}}(t_{\text{и}} + t_{\text{п}}) = U_{\text{вых}}t_{\text{п}}. \quad (14)$$

В качестве системы управления транзисторов VT1–VT3 используется генератор импульсов G11–G13.

Сдвиг фазы первого генератора (phase delay) φ_1 равен нулю.

Сдвиг фазы второго генератора:

$$\varphi_2 = T_T/3.$$

Сдвиг фазы третьего генератора:

$$\varphi_3 = (T_T/3) * 2.$$

Результаты расчетов основных параметров ППН сведены в таблице 2.

Используя исходные (таблица 1) и расчетные данные (таблица 2), можно приступить к моделированию с использованием имитационной модели повышающего ППН трехфазной структуры и проведению экспериментальных работ. Более подробная методика проектирования ППН с трехфазным чередованием описана в [8].

Результаты экспериментального исследования режимов работы трехфазного преобразователя постоянного напряжения с чередованием фаз повышающего типа

Имитационная модель была построена на основе математических формул, описывающих работу ППН трехфазной

Таблица 1. Исходные данные для расчета основных параметров ППН.

№	Параметры	Значение
1	Входное напряжение $U_{\text{вх}}$, В	400
2	Выходное напряжение $U_{\text{вых}}$, В	650
3	Мощность нагрузки $P_{\text{н}}$, кВт	50
4	Суммарная частота ППН $f_{\text{сумм}}$, кГц	60
5	Число фаз (модулей) ППН, n	3

Таблица 2. Основные расчетные параметры ППН.

№	Параметры	Значения
1	Максимальный коэффициент заполнения импульсов D , %	38,5
2	Индуктивность одной катушки (уточненный) L_{1y} , Гн	$3,244 \cdot 10^{-5}$
3	Частота преобразования одной фазы f , Гц	20000
4	Емкость конденсатора фильтра $C_{\text{вых.min}}$, Ф	$6,713 \cdot 10^{-5}$
5	Период такта T_T , с	$1,667 \cdot 10^{-5}$
6	Период импульса $T_{\text{и}}$, с	$5,556 \cdot 10^{-6}$
7	Время импульса $t_{\text{и}}$, с	$2,137 \cdot 10^{-6}$
8	Сдвиг фазы второго генератора t_{φ_2} , с	$5,556 \cdot 10^{-6}$
9	Сдвиг фазы третьего генератора t_{φ_3} , с	$1,111 \cdot 10^{-5}$

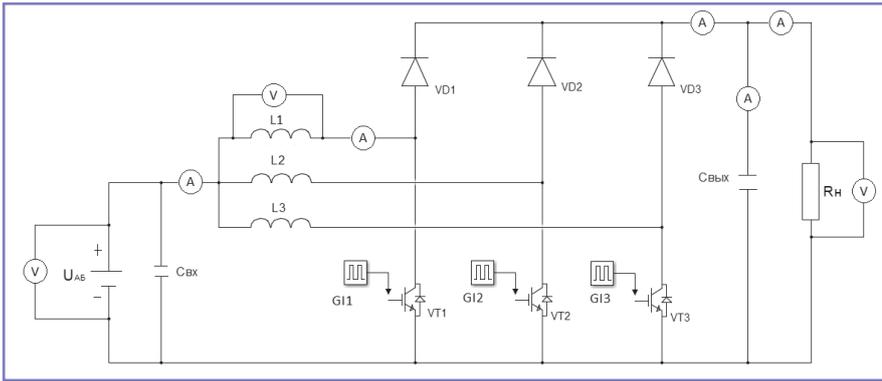


Рис. 2. Имитационная модель ППН при активной нагрузке.

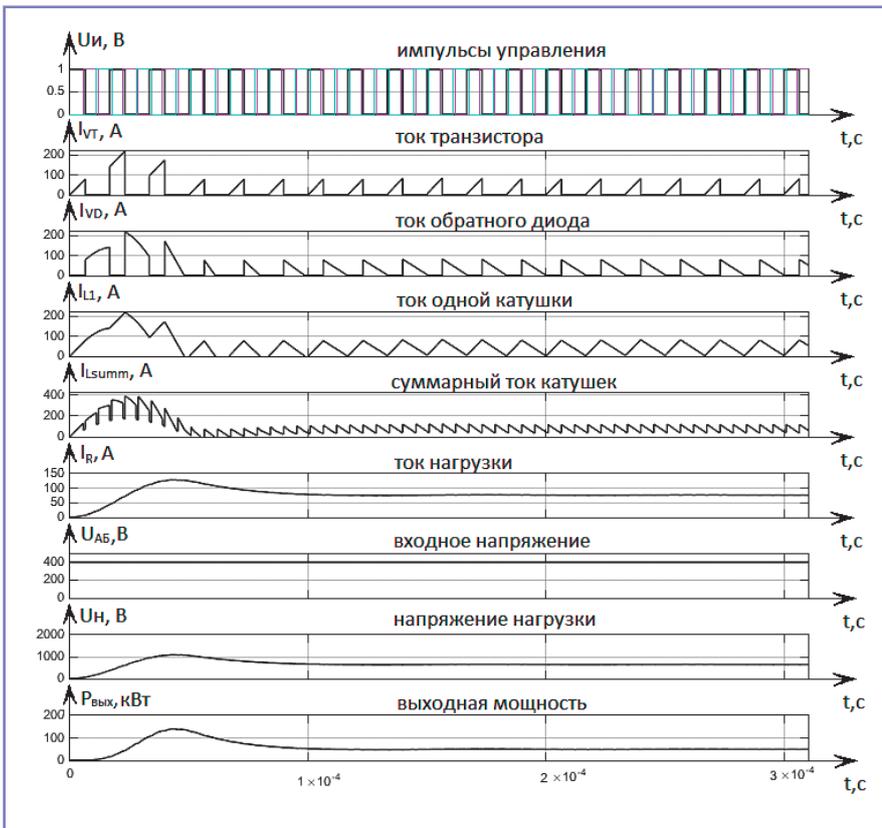


Рис. 3. Переходные процессы параметров ППН при активной нагрузке.

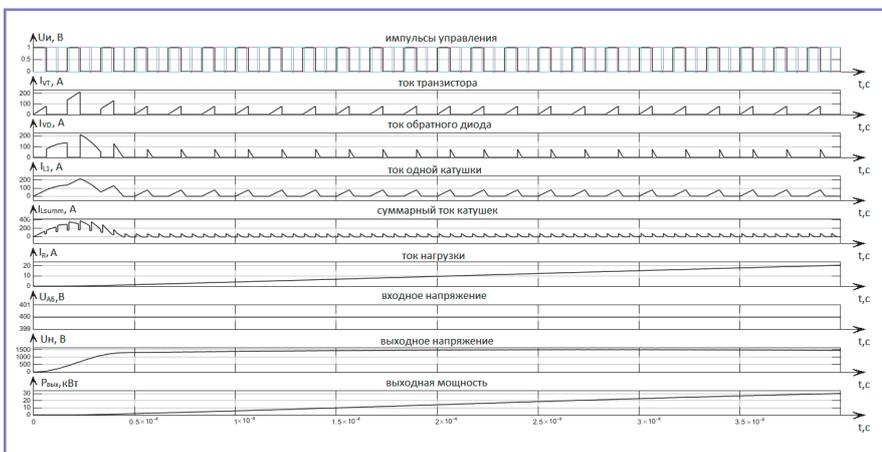


Рис. 4. Переходные процессы параметров ППН при активно-индуктивной нагрузке.

структуры, показанной на рис. 1. Модель состоит из источника напряжения U_{AB} , катушек индуктивностей L_1-L_3 , генераторов импульсов $G1-G3$, транзисторных ключей VT_1-VT_3 , диодов VD_1-VD_3 , входного и выходного конденсаторов фильтра $C_{ВХ}$, $C_{ВЫХ}$, сопротивления нагрузки R_H и различных датчиков тока и напряжения для измерения соответствующих параметров. Имитационная модель повышающего ППН при активной нагрузке и соответствующие переходные процессы представлены на рис. 2–3.

Как видно на рис. 3, пульсация суммарного тока всех трех катушек значительно снижена по сравнению с пульсацией одной катушки (одной фазы), что значительно облегчает его сглаживание. При этом снижаются требуемая емкость и, соответственно, массы и габариты фильтрующего конденсатора. Таким образом, еще раз подтверждается увеличение эффективности и массогабаритных характеристик ППН многофазного типа.

На рис. 4 показаны результаты работы ППН при активно-индуктивной нагрузке.

Как видно на рис. 4, переходный процесс токов в ключевых элементах почти не отличается от аналогичной характеристики при активной нагрузке, однако из-за влияния индуктивности нагрузки продолжительность увеличения тока нагрузки до номинального значения заметно увеличилась.

Выводы

Применение многофазных ППН в значительной степени улучшает массогабаритные характеристики с одновременным улучшением качеств выходных параметров (снижение пульсации тока и напряжения).

Продемонстрированы результаты экспериментальных характеристик ППН, анализ которых показал повышение эффективности применения преобразователей с многофазной структурой.

Применение ППН многофазной структуры в системах преобразования энергии в современных электроприводах, в том числе силовых установках перспективных транспортных средств на электрической тяге, способствует повышению эффективности этих систем.

Литература

1. Ют, В.Е. Применение преобразователей постоянного напряжения в составе энергетической установки электрического транспортного средства / В.Е. Ют, В.В. Лохнин, К.М. Си-

доров, К.Х. Гулямов // Вестник МАДИ. – 2015. – № 4. – С. 34–40.

2. Ютт, В.Е. Электрооборудование автомобилей: учебное пособие / В.Е. Ютт. – М.: Горячая Линия – Телеком, 2006. – 440 с.

3. Константинов, В.Г. Многофазные преобразователи на транзисторах / В.Г. Константинов. – М.: Энергия, 1972. – 96 с.

4. Букреев, С.С. Силовые электронные устройства. Введение в автоматизированное проектирование. / С.С. Букреев. – М.: Радио и связь, 1982. – 256 с.

5. Конев, Ю.И. Электронная техника в автоматике / под ред. Ю.И. Конева. – М.: Советское радио – № 7. 1975. – 160 с.

6. A. Shrud et al. Analysis and simulation of automotive interleaved buck converter / A. Shrud et al. // Engineering and Technology. – 2010. – № 3. – P. 392–399.

7. Alarqt, F.S. Analysis and simulation of interleaved boost converter for automotive applications / F.S. Alarqt, A.S. Ashur // in Proc. the 1st International Conference on Electrical and Computer Engineering. – 2013. – № 11. – P. 76–82.

8. Jih-Sheng Lai. Energy management power converters in hybrid electric and fuel cell vehicles / L. Jih-Sheng, J. N Douglas // Proc. IEEE, – 2007. – № 4. – P. 766–777.

Ютт Владимир Евсеевич

Родился в 1940 году. В 1962 году окончил Московский автомеханический институт по специальности «Инженер-механик». В 1967 году защитил кандидатскую диссертацию по теме «Электропусковые системы», в 1980 году –

докторскую диссертацию по теме «Диагностика электрооборудования автомобилей». Имеет ученое звание профессора. Опыт работы – 51 год. В настоящее время работает заведующим кафедрой «Электротехника и электрооборудование» Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). Имеет более 200 научных трудов, патентов. Заслуженный деятель науки и техники РФ, Почетный работник высшей школы, награжден двумя медалями.

Голубчик Тимофей Владимирович

Родился в 1984 году. В 2006 году окончил Московский автомобильно-дорожный институт МАДИ по специальности «Электрооборудование автомобилей и тракторов». Кандидат технических наук, в 2009 году защитил диссертацию по теме «Выбор параметров комбинированной энергетической установки автомобилей с применением математического моделирования». Имеет 11-летний опыт работы. В настоящее время работает доцентом на кафедре «Электротехника и электрооборудование» МАДИ. Имеет 26 печатных работ, в том числе 1 патент.

Гулямов Камол Хикматович

Родился в 1989 году. В 2012 году окончил Таджикский технический университет им. академика М.С. Осими по специальности «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов». Опыт работы – 2 года. В настоящее время учится в аспирантуре Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ).

Jutt Vladimir

Was born in 1940. In 1962 he graduated from The Moscow Automotive Institute by specialty «Mechanical engineer». In 1967 has protected Ph. D. thesis by the theme «Electro starting systems», in 1980 the thesis for a Doctor's degree by the theme «Car's electric equipment diagnostics». He has academic status of professor. Operational experience of 51 years. Now Vladimir works as head of sub-faculty of «Electrical engineer and electric equipment» in Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI). He has more than 200 names of proceedings, patents. Honored worker of science and engineering of Russian Federation, the Honorable worker of Higher school, conferred by two medals.

Golubchik Timofey

Was born in 1984. In 2006 he graduated from Moscow Motor-road Institute MADI, speciality is «Car and tractor electric equipment». He is a candidate of technical science, in 2009 he defended a thesis, the theme is «Parameter choice of car combined power generating system with the use of mathematical modelling». Work experience is 11 years. At present he is an associate professor in the «Electrical engineering and equipment» department of MADI. He has 26 printed works, including 1 patent.

Gulyamov Kamol

He was born in 1989. In 2012 he graduated from Tadjik Technical University majoring in «Electric drive and automation of industrial machines and technological complexes». He has 2 years of work experience. At present he studies in graduate school of Moscow Automobile and Road Construction State Technical University.

К практическому применению управляемого компенсатора жесткости на неодимовых магнитах

// To practical application of controlled compensator stiffness neodymium magnets //

Панченко Ю.В.,
НПО ПАО «ЭЛСИБ», г. Новосибирск

Курбатов В.С.,
ФГУП ПО «СЕВЕР», г. Новосибирск

Макаров С.В.,
Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск

В данной статье выведен закон, необходимый для системы перестройки неодимового компенсатора жесткости, а именно – зависимость тяговой силы от осевого расстояния между магнитами якоря и дисков. В ходе работы получена и представлена зависимость развиваемого тягового усилия от величины угла поворота якоря относительно основания в компенсаторе жесткости.
Ключевые слова: вибрация, неодимовый магнит, виброизоляция, компенсатор жесткости, система перестройки.

В последнее время человеку все чаще приходится сталкиваться с проблемой шумов и вибрации. Растущее число транспорта, а также развитие промышленности побуждают рассматривать проблему вибрации как одну из актуальных в наши дни. Воздействия шумов и вибрации, создаваемых различным оборудованием, как правило, негативно сказываются не только на окружающей среде, но и на здоровье людей, работающих на этом оборудовании. Однако не только исходя из санитарных и экологических норм следует сводить уровни механических колебаний к минимуму.

Наиболее перспективным средством борьбы с вибрацией является установка виброизоляторов, то есть поддресорирование виброактивного оборудования. Данный метод позволяет существенно снизить уровень вибрации. Однако виброизоляторы малоэффективны при низкочастотных колебаниях, что говорит о несовершенстве их конструкции.

Использование в конструкции виброизолятора компенсатора жестко-

In this article discusses one of the options of restructuring of the system for the compensator stiffness permanent magnets, that is changing the axial distance between the magnets. During operation was obtained and shows the thrust developed by the magnitude of the armature relative to the base angle compensator stiffness.

Keywords: vibration, neodymium magnet, vibration protection, stiffness compensator adjustment system.

сти позволяет существенно повысить эффективность устройства подвески [1, 2]. Компенсатор жесткости обладает тяговой характеристикой, имеющей отрицательную жесткость, но по абсолютной величине равной характеристике упругого элемента, также входящего в виброизолирующую подвеску.

В [3, 4] предложено устройство виброизолятора, снабженного компенсатором жесткости на основе электромагнитов. В [5] с целью уменьшения габаритов устройства авторами предложено заменить электромагнитные катушки на неодимовые магниты. Необходимым условием абсолютной виброизоляции является система перестройки, позволяющая подстраивать компенсатор жесткости под внешнее воздействие таким образом, чтобы обеспечить полную виброизоляцию при различных внешних воздействиях.

Стоит отметить, что система перестройки компенсатора жесткости, основа работы которого строится на электромагнитах, проста в реализации, так как имеется возможность регулиро-

вать питание электромагнитов, а следовательно, и изменять усилие, вызванное их взаимодействием. В компенсаторе жесткости на неодимовых магнитах реализация системы перестройки затруднена, так как нет возможности изменить характеристики магнитов. Необходимо выделить наиболее подходящий способ регулировки жесткости компенсатора.

В данной статье предлагается использовать систему перестройки компенсатора жесткости, реализованного на неодимовых магнитах с использованием поворотного якоря с магнитами. Суть этого способа состоит в том, что датчик относительного положения защищаемого и вибрирующего объекта передает сигнал устройству, приводящему во вращение шток с якорем. Якорь с установленными магнитами, вращаясь, меняет осевое расстояние между центрами магнитов, из-за чего изменяется сила взаимодействия между магнитами якоря и основания компенсатора жесткости.

В данной работе рассмотрена зависимость тягового усилия, развиваемого в компенсаторе жесткости, в зависимости от угла поворота якоря. Исходя из уравнения, представленного в работе [6], силу взаимодействия между магнитами при их сдвиге можно определить из следующей зависимости:

$$F(r) = \frac{\pi}{2\mu_0} B_0^2 R^4 \sum_{i,j=0}^1 \frac{(-1)^{i+j}}{(x+h(i+j))^2} \times \left(1 - \frac{3}{2} \frac{r^2}{(x+h(i+j))^2}\right). \quad (1)$$

Зависимость (1) показывает зависимость тягового усилия от осевого расстояния между двумя магнитами.

В конструкции компенсатора жесткости предполагается использование трех встречно направленных магнитов, расположенных полюсами таким образом, чтобы притягиваться друг к другу (рис. 1а).

Зависимость силы возникающей в компенсаторе жесткости при сдвиге магнитов:

$$F(r) = \frac{\pi}{2\mu_0} B_0^2 R^4 \sum_{i,j=0}^1 \frac{(-1)^{i+j}}{(x+h(i+j))^2} \times \left(1 - \frac{3}{2} \frac{r^2}{(x+h(i+j))^2}\right) - \frac{(-1)^{i+j}}{(b-x+h(i+j))^2} \left(1 - \frac{3}{2} \frac{r^2}{(b-x+h(i+j))^2}\right), \quad (2)$$

где r – расстояние между центрами магнитов; B_0 – остаточная магнитная индукция магнита; R – радиус магнита; h – высота неодимового магнита; x – величина зазора между магнитами якоря и основания.

Выраженная таким образом оптимальная зависимость представляет собой сумму двойного ряда [7], то есть суммы множества чисел, элементам которого приписаны целые положительные индексы i и j .

На рис. 1 видно, что уложенные в основании компенсатора жесткости магниты 1 и 2 взаимодействуют с подвижным якорем устройства через магнит 3. Таким образом, исходя из треугольника ABC, можно установить зависимость расстояния между магнитами от угла поворота якоря устройства.

Расстояние между магнитами имеет зависимость от угла поворота якоря согласно теореме косинусов:

$$r(\alpha) = \sqrt{2R_y(1 - \cos(\alpha))}, \quad (3)$$

где R_y – радиус установки магнитов в якорь.

Стоит отметить, что на магниты якоря оказывают влияние все магниты устройства. Однако конструкция виброизолятора выполнена таким образом, чтобы свести к минимуму влияние соседних

магнитов друг на друга, и поэтому их влиянием можно пренебречь. Как можно заметить на рис. 1б, на магнит якоря при некотором угле поворота α самое сильное влияние оказывают два соседних магнита основания 1 и 2, между которыми он в данный момент находится. Таким образом, необходимо учесть это влияние на якорь.

Исходя из условия, что магниты, уложенные в якорь и основание, имеют одинаковые характеристики, можно описать силу, с которой они воздействуют на магнит якоря.

Зависимость тягового усилия между магнитами от угла сдвига якоря:

$$F(\alpha) = \frac{\pi}{2\mu_0} B_0^2 R^4 \sum_{i,j=0}^1 \frac{(-1)^{i+j}}{(x+h(i+j))^2} \times \left(2 - \frac{3R_y(2 - \cos(\alpha) - \cos(60 - \alpha))}{(x+h(i+j))^2}\right) - \frac{(-1)^{i+j}}{(b-x+h(i+j))^2} \times \left(2 - \frac{3R_y(2 - \cos(\alpha) - \cos(60 - \alpha))}{(b-x+h(i+j))^2}\right). \quad (4)$$

Согласно формуле (4) построена зависимость тягового усилия действующего на магнит якоря от угла сдвига (рис. 2).

Как видно из рис. 2, максимальным значением угла является угол между двумя магнитами в основании компенсатора жесткости 60° . Максимальными значениями усилия взаимодействия якоря и основания компенсатора жесткости являются углы 0° и 60° , в которых магниты якоря и основания расположены непосредственно на одной оси. Также из данного графика видно, что минимальное усилие развивается магнитами в том положении, когда магниты якоря

расположены между магнитами основания компенсатора жесткости. Таким образом, можно сделать вывод, что минимальное усилие между магнитами практически в два раза меньше, чем максимальное развиваемое усилие.

Исходя из результатов данной зависимости установлено, что при изменении угла поворота якоря можно менять тяговое усилие, а следовательно, и наклон тяговой характеристики компенсатора жесткости. Это позволит виброизолирующей системе подстраиваться под уровень колебаний и тем самым эффективно их изолировать. В дальнейших исследованиях предложенная система перестройки может быть реализована в конструкции виброизолятора.

Данная разработка выполнена при поддержке Гранта РФФИ «Эврика! Идея» 2016 года № 16-32-80134 и Плана стратегического развития НГТУ С-5.

Литература

1. Зуев, А.А. Проблемы виброизоляции [Текст] / А.А. Зуев, А.К. Зуев, В.А. Четверкин // Проблемы виброизоляции на судах: сб. научн. тр. / Новосибирская государственная академия водного транспорта. – Новосибирск, 2003. – С. 43–55.
2. Зуев, А.К. Вибрации машин и пути их виброизоляции [Текст] / А.К. Зуев // Вопросы виброизоляции судовых механизмов и машин: сб. научн. тр. / Новосибирский институт инженеров водного транспорта. – Новосибирск, 1983. – С. 6–18.
3. Гурова, Е.Г. Виброизолирующая подвеска судовой энергетической установки с нелинейным электромагнитным компенсатором жесткости [Текст]: автореферат дисс. канд. техн. наук / Гурова Елена Геннадьевна. – Новосибирск, 2008. – 23 с.

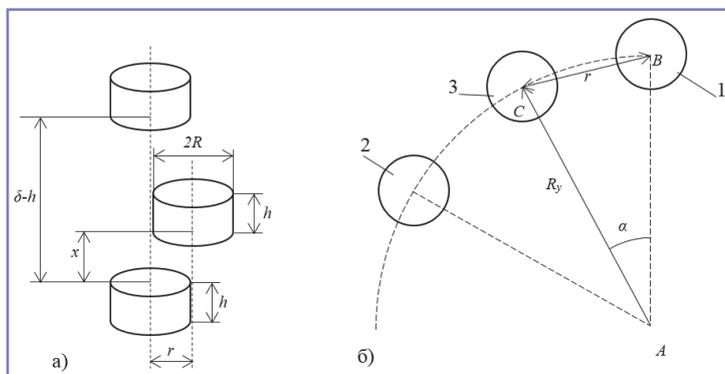


Рис. 1. Схематичное расположение магнитов в компенсаторе жесткости: а) расположение магнитов якоря и основания компенсатора жесткости; б) расположение магнитов при виде сверху.

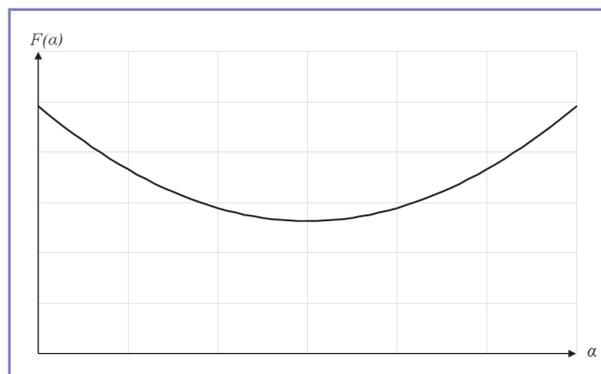


Рис. 2. Характеристика зависимости силы от угла поворота якоря.

4. Гурова, Е.Г. Виброизолирующие подвески транспортных энергетических установок с нелинейными электромагнитными компенсаторами жесткости: проектирование и расчет: монография / Е.Г. Гурова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – 156 с.
5. Гурова, Е.Г. К применению неодимовых магнитов в виброизолирующих устройствах на транспорте [Текст] / Е.Г. Гурова, О.Н. Бондаренко, С.С. Бакин, Д.Е. Батулин, А.О. Колинченко, А.А. Сергеев // Научное сообщество студентов XXI столетия: технические науки: сб. научн. тр. – Новосибирск, 2012. – № 5. – С. 178–183.
6. Vokoun, David. Magnetostatic interactions and forces between cylindrical permanent magnets [Текст] / D. Vokoun, M. Beleggia, L. Heller, P. Sittner; Journal of magnetism and magnetic materials 321 (22): 3758–3763 pages.
7. Воробьев, Н.Н. Теория рядов [Текст] / Н.Н. Воробьев. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 408 с.

Панченко Юрий Вадимович

Родился в 1994 году. В 2016 году окончил ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет» по специальности «Электроэнергетика и электротехника». В настоящее время работает инженером-конструктором в НПО ПАО «ЭЛСИБ». Имеет 2 научные статьи.

Курбатов Владимир Сергеевич

Родился в 1984 году. В 2006 году окончил Новосибирскую государственную академию водного транспорта по специальности «Эксплуатация судов и судового оборудования». Опыт работы – 10 лет. В настоящее время работает начальником бюро конструкторского отдела ФГУП ПО «СЕВЕР».

Макаров Станислав Владимирович

Родился в 1988 году. Окончил Новосибирский государственный технический университет. Опыт работы – 4 года. В настоящее время работает ассистентом кафедры электротехни-

ческих комплексов (ЭТК) Новосибирского государственного технического университета.

Panchenko Yuri

He was born in 1994. In 2016 he graduated from Novosibirsk State Technical University majoring in «Electric industry and electric engineering». At present he works as engineering designer at ELSIB Company. He has 2 scientific articles.

Kurbatov Vladimir

He was born in 1984. In 2006 he graduated from Novosibirsk State University of Water Transport majoring in «Ships and marine equipment operation». At present he works as head department of design bureau of «SEVER» Manufacturing group.

Makarov Stanislav

He was born in 1988. He graduated from Novosibirsk State Technical University. He has 4 years of work experience. At present he works as teaching assistant of Electrical systems department of Novosibirsk State Technical University.

Трехфазный трансформатор со стабилизирующими свойствами

// The three-phase transformer with stabilizing properties //

**Ким К.К., д.т. н., профессор,
Ткачук А.А.,
ПГУПС, г. Санкт-Петербург**

В статье рассматривается новый трехфазный трансформатор со стабилизирующими свойствами. Новизна заключается в расщеплении каждого стержня на два подстержня. Стабилизирующие свойства обусловлены конструктивными изменениями в его магнитной и электрической системах. Показано влияние тока короткозамкнутых витков, навитых на один подстержень каждой фазы, на стабилизацию напряжения.

Ключевые слова: трехфазный трансформатор, первичная и вторичная обмотки, магнитная система, короткозамкнутые витки, магнитное сопротивление.

Одной из серьезных проблем, возникающих на тяговых подстанциях постоянного тока, является снижение уровня выпрямленного напряжения U_d ниже номинальных 3300 В при движении тяговых или высокоскоростных электроподвижных составов, когда потребляемый выпрямленный ток I_d превышает на 25–50% свое номинальное значение.

Существующие способы и системы, выполненные на базе управляемых полупроводниковых приборов и обеспечивающие компенсацию снижения напряжения U_d тяговой подстанции, способны обеспечить требуемую компенсацию напряжения на тяговой подстанции, но такие системы отличаются невысоким показателем надежности, что может привести к отказу всей системы тягового электроснабжения.

Устройства стабилизации напряжения, выполненные на базе реакторов, подмагничиваемых постоянным током, отличаются невысоким показателем стабилизации напряжения, что приводит к снижению пропускной способности

The construction of the three-phase transformer with stabilizing properties is presented. The novelty is the splittance of each leg in two segments. The stabilizing properties are caused by the constructive changes in the magnetic system and the electrical system. We demonstrate the influence of the current of short-circuit turns on the voltage stabilization. The short-circuit turns are rounded on the a segment of the each phase.

Keywords: three-phase transformer, primary winding, secondary winding, magnetic system, reluctance.

высокоскоростных линий железнодорожного транспорта.

Вопрос стабилизации напряжения на тяговой подстанции постоянного тока приобретает особое звучание в условиях увеличенного грузопотока, а также высокой стоимости управляемых полупроводниковых устройств.

Авторами предлагается использовать новый трехфазный трансформатор

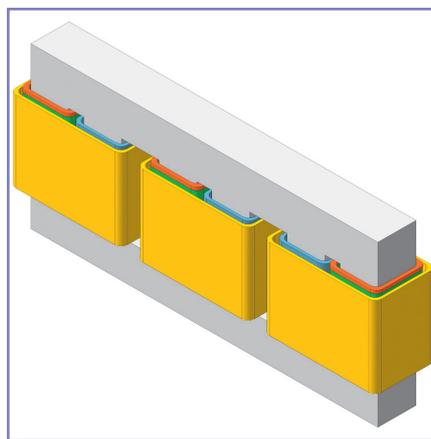


Рис. 1. Трехфазный трансформатор со стабилизирующими свойствами.

со стабилизирующими свойствами. На рис. 1 представлена конструкция данного трансформатора.

Так как магнитопровод трансформатора симметричен относительно среднего стержня, рассмотрим подробнее строение только одной фазы трансформатора, выберем фазу «А» (рис. 2).

Магнитная система фазы «А» состоит из ярем 1 и стержня 2 (очерчен штриховой линией), расщепленного на два подстержня 3 и 4, выполненных из шихтованных листов электротехнической стали марки Э100. Подстержни 3 и 4 выполнены с одинаковыми площадями поперечных сечений. Вторичная обмотка состоит из двух последовательно соединенных секций 5 и 6 с разными числами витков. На первый подстержень намотана первая секция, на второй подстержень – вторая секция вторичной обмотки. Поверх секций вторичной обмотки располагается первичная обмотка 7. Кроме того, на первый подстержень в верхней его части намотаны короткозамкнутые витки 8. Первичные фазные обмотки соединены по схеме «Звезда», а вторичные – по схеме «Треугольник».

Принцип стабилизирующего действия трансформатора основан на зависимости от нагрузки размагничивающего действия

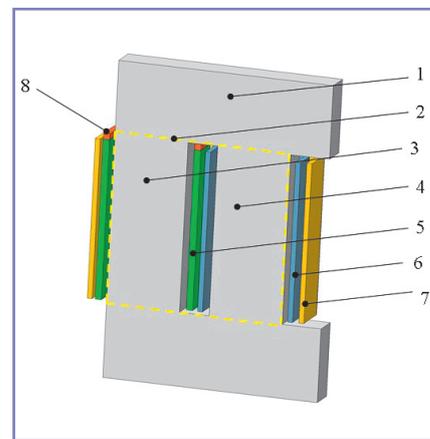


Рис. 2. Расщепленный стержень и обмотки фазы «А».

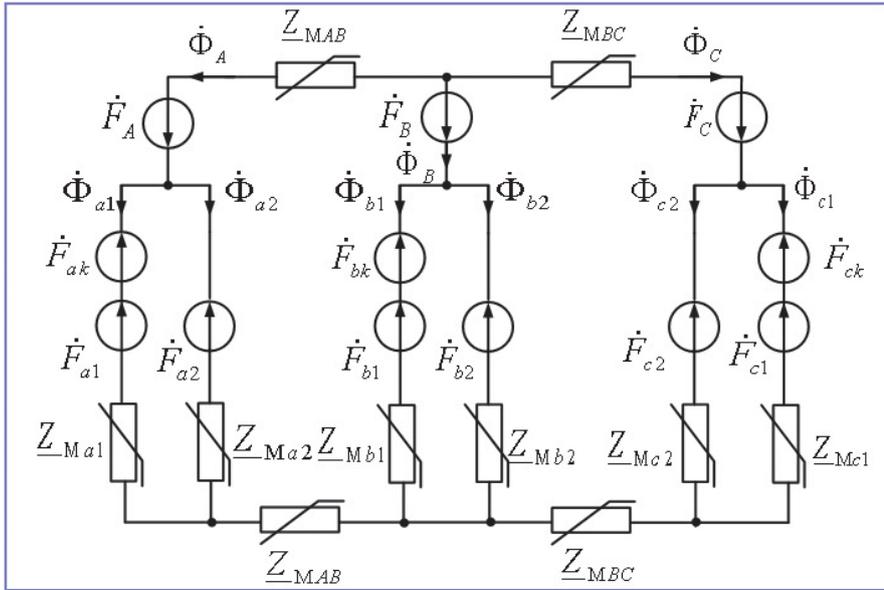


Рис. 3. Эквивалентная схема магнитной цепи трехфазного трансформатора без учета потоков рассеяния.

короткозамкнутых витков, в результате которого появляется различие в величинах магнитных потоков, замыкающихся по подстречням, имеющих короткозамкнутые витки и не имеющих таковых.

На рис. 3 показана эквивалентная схема магнитной цепи трансформатора со стабилизирующими свойствами (без учета потоков рассеяния).

Здесь $\dot{\Phi}_A, \dot{\Phi}_B, \dot{\Phi}_C$ – магнитные потоки стержней фаз «А», «В», «С»;

$\dot{\Phi}_{a1}, \dot{\Phi}_{b1}, \dot{\Phi}_{c1}$ – магнитные потоки первых подстержней фаз «А», «В», «С»;

$\dot{\Phi}_{a2}, \dot{\Phi}_{b2}, \dot{\Phi}_{c2}$ – магнитные потоки вторых подстержней фаз «А», «В», «С»;

$Z_{Ma1}, Z_{Mb1}, Z_{Mc1}$ – полные магнитные сопротивления первых подстержней фаз «А», «В», «С»;

$Z_{Ma2}, Z_{Mb2}, Z_{Mc2}$ – полные магнитные сопротивления вторых подстержней фаз «А», «В», «С»;

$\dot{F}_A, \dot{F}_B, \dot{F}_C$ – магнитодвижущие силы первичных обмоток фаз «А», «В», «С»;

$\dot{F}_{a1}, \dot{F}_{b1}, \dot{F}_{c1}$ – магнитодвижущие силы первых секций вторичных обмоток фаз «А», «В», «С»;

$\dot{F}_{a2}, \dot{F}_{b2}, \dot{F}_{c2}$ – магнитодвижущие силы вторых секций вторичных обмоток фаз «А», «В», «С»;

$\dot{F}_{ak}, \dot{F}_{bk}, \dot{F}_{ck}$ – магнитодвижущие силы короткозамкнутых витков фаз «А», «В», «С».

Для первых гармоник составим по законам Кирхгофа для магнитной цепи следующую систему комплексных уравнений – формула (1).

Полное магнитное сопротивление подстержня – формулы (2) и (3).

$$\left\{ \begin{aligned} &\dot{\Phi}_A + \dot{\Phi}_B + \dot{\Phi}_C = 0, \\ &-\dot{\Phi}_A + \dot{\Phi}_{a1} + \dot{\Phi}_{a2} = 0, \\ &-\dot{\Phi}_B + \dot{\Phi}_{b1} + \dot{\Phi}_{b2} = 0, \\ &-\dot{\Phi}_C + \dot{\Phi}_{c1} + \dot{\Phi}_{c2} = 0, \\ &-\dot{\Phi}_{a1} Z_{Ma1} + \dot{\Phi}_{a2} Z_{Ma2} = -\dot{F}_{a1} + \dot{F}_{a2} + \dot{F}_{ak}, \\ &\dot{\Phi}_{b1} Z_{Mb1} - \dot{\Phi}_{a2} Z_{Ma2} - 2\dot{\Phi}_A Z_{MAB} = \dot{F}_B - \dot{F}_{b1} - \dot{F}_{bk} + \dot{F}_{a2} - \dot{F}_A, \\ &\dot{\Phi}_{b2} Z_{Mb2} - \dot{\Phi}_{b1} Z_{Mb1} = -\dot{F}_{b2} + \dot{F}_{b1} + \dot{F}_{bk}, \\ &\dot{\Phi}_{c2} Z_{Mc2} - \dot{\Phi}_{b2} Z_{Mb2} + 2\dot{\Phi}_C Z_{MBC} = \dot{F}_C - \dot{F}_{c2} + \dot{F}_{b2} - \dot{F}_B, \\ &-\dot{\Phi}_{c1} Z_{Mc1} + \dot{\Phi}_{c2} Z_{Mc2} = \dot{F}_C - \dot{F}_{c1} - \dot{F}_{ck}. \end{aligned} \right. \quad (1)$$

$$Z_M = \frac{\dot{\rho}_Z l_C}{S_C}, \quad (2)$$

$$\dot{\rho}_Z = \rho_R + j\rho_X \quad (3)$$

где $\dot{\rho}_Z$ – полное удельное магнитное сопротивление; ρ_R – активное удельное магнитное сопротивление; ρ_X – реактивное удельное магнитное сопротивление; l_C – длина сердечника; S_C – площадь поперечного сечения сердечника.

Поскольку зависимости $\rho_R(B)$ и $\rho_X(B)$ нелинейны (B – магнитная индукция), система уравнений (1) решалась численным методом, в качестве которого был выбран метод конечных элементов, реализованный на базе пакета программы ELCUT. При этом рассматривалась 1/2 всей конструкции трехфазного трансформатора.

Расчет выполнялся для трансформатора с параметрами, приведенными в таблице 1.

В ходе расчета магнитного поля трансформатора в режиме холостого хода получена картина поля (рис. 4), из

которой видно, что вторые подстержни намагничены одинаково до значения 1,55 Тл, которое укладывается в нормы для стали марки Э100. Рассмотрим подробнее фазу «А» (рис. 5).

Таблица 1. Параметры трансформатора.

Параметр трансформатора	Значение
Мощность трансформатора	11466 кВА
Напряжение первичной обмотки	35 кВ
Напряжение вторичной обмотки (соответствует выпрямленному напряжению тяговой подстанции, равному 3685,5 В)	2730 В
Число витков первичной обмотки	336
Число витков первой секции вторичной обмотки	30
Число витков второй секции вторичной обмотки	22
Число короткозамкнутых витков	5
Толщина подстержня	0,6 м
Ширина участка подстержня	0,6 м
Высота участка подстержня	1,38 м
Материала сердечника	Сталь шихтованная, марка Э100 (электротехническая, сернистая)

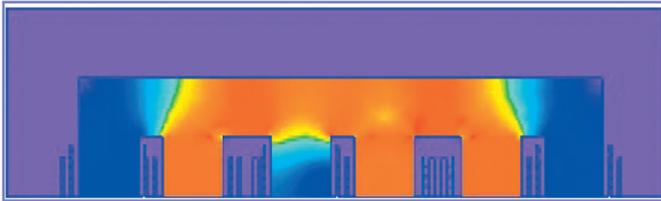


Рис. 4. Картина магнитного поля трехфазного трансформатора в режиме холостого хода.

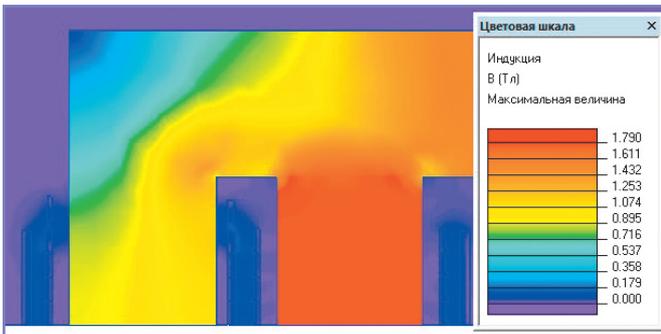


Рис. 6. Картина магнитного поля фазы «А» трехфазного трансформатора в номинальном режиме его работы.

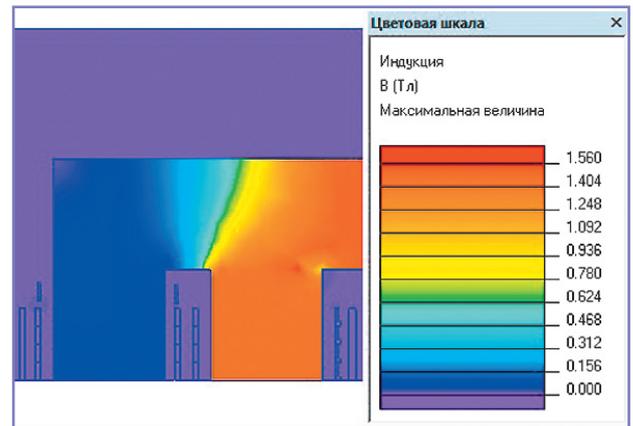


Рис. 5. Картина магнитного поля фазы «А» в режиме холостого хода трансформатора.

Как видно из рис. 5, первый подстержень намагничен только до значения 0,15 Тл, такое возможно лишь с использованием короткозамкнутых витков.

Как показал расчет магнитного поля трансформатора, и в номинальном режиме (рис. 6) материал первого подстержня намагничивается незначительно, максимальное значение индукции составляет 1 Тл, что в 1,55 раза ниже нормативного значения. Материал второго подстержня намагничен до степени, при которой максимальное значение индукции превышает нормативное в 1,2 раза.

При исследовании распределения магнитных потоков между подстержнями фаз были получены зависимости, показанные на рис. 7 и рис. 8.

Установлено, что скорость изменения намагничивания материала участков магнитопровода трансформатора (рис. 7) влияет на его внешнюю характеристику (рис. 8).

Весь диапазон изменения тока вторичной обмотки можно разделить на три поддиапазона. На первом поддиапазоне, на котором ток вторичной обмотки возрастает с 8 А до 500 А (рис. 7, кривая 1), относительная магнитная проницаемость материала первого подстержня возрастает с 1740 до 1860, а относительная магнитная проницаемость материала второго подстержня (рис. 7, кривая 2) убывает от 1698 до 800. Скорость изменения относительной магнитной проницаемости для кривой 2 больше, чем для 1.

Согласно рис. 8 на первом поддиапазоне напряжение вторичной обмотки снижается незначительно – с 2679 В до 2674 В.

На втором поддиапазоне (ток увеличивается с 500 А до 1400 А) относительная магнитная проницаемость материала первого подстержня (рис. 7) продолжает возрастать с 1860 до 2500, а относительная магнитная проницаемость материала второго подстержня убывает с меньшей скоростью, чем на первом поддиапазоне. Напряжение вторичной обмотки при этом возрастает с 2674 В до 2732 В (рис. 8).

На третьем поддиапазоне (ток увеличивается с 1400 А до 2086 А) относительная магнитная проницаемость материала первого подстержня убыва-

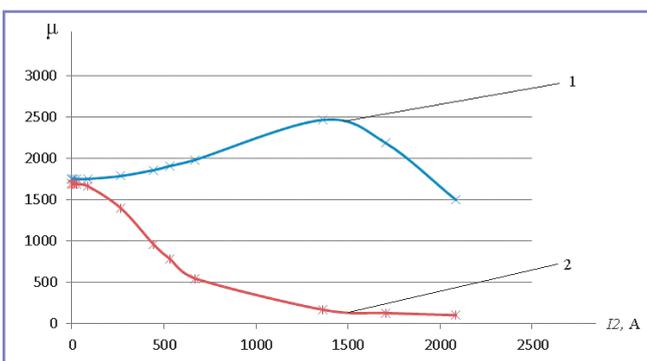


Рис. 7. Зависимость относительной магнитной проницаемости материала подстержней от величины тока вторичной обмотки: кривая 1 – для первого подстержня, кривая 2 – для второго подстержня.

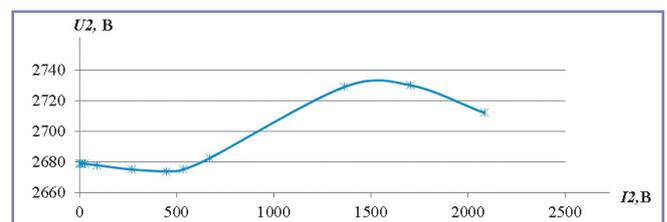


Рис. 8. Зависимость фазного напряжения вторичной обмотки от тока вторичной обмотки.

ет с большей скоростью по сравнению с убыванием относительной магнитной проницаемости материала второго подстержня (рис. 7), при этом напряжение вторичной обмотки уменьшается до значения 2712 В. При значениях тока вторичной обмотки ~ 2000 А наступает критический режим, когда магнитная проницаемость материала второго подстержня стремится к 0, а напряжение вторичной обмотки уменьшается на 0,7% от своего номинального значения. Это приводит к тому, что трехфазный трансформатор теряет все свои стабилизирующие свойства и ведет себя как обычный силовой трансформатор с подстержнями, материал которых находится в состоянии насыщения. Поэтому для получения стабилизирующего действия трансформатора в условиях больших токов вторичных обмоток рекомендуется использовать подстержни с большими площадями поперечных сечений, а также увеличивать число короткозамкнутых витков для того, чтобы материал первых подстержней не был в состоянии насыщения.

Следует заметить, что выпрямленному току тяговой подстанции (току нагрузки), равному 3142,25 А, соответствует ток вторичной обмотки трансформатора, составляющий 1480 А. Таким образом, рассматриваемый трансформатор со стабилизирующими свойствами способен выдерживать реальные токовые перегрузки и пригоден для установки на тяговых подстанциях постоянного тока высокоскоростных и грузонапря-

женных участков железнодорожных магистралей.

Выводы

1. Использование расщепления стержней магнитопровода трансформатора позволяет придать последнему стабилизирующие свойства.

2. Использование короткозамкнутых витков позволяет сохранить эффект стабилизации напряжения вторичной обмотки при критических токовых перегрузках.

3. Поскольку в конструктивной схеме трансформатора отсутствуют устройства, питаемые от постоянного тока, данный трансформатор со стабилизирующими свойствами может использоваться также на дорогах переменного тока.

Литература

1. Пат. 146074, Российская Федерация, МПК Н01F30/12. Трансформаторный агрегат для электрифицированных железных дорог переменного тока / Ким К.К., Титова Т.С., Ткачук А.А.; заявитель и патентообладатель – Петербургский государственный университет путей сообщения. – № 2014117369/07; заявл. 29.04.2014; опубл. 27.09.2014. Бюл. № 27. 4 с.

Ким Константин Константинович

Родился в 1958 году. В 1980 году окончил Ленинградский политехнический институт (ЛПИ) по специальности «Инженерная электрофизика». Доктор технических наук, профессор. В 1998 году защитил докторскую диссертацию на тему «Электродинамика систем электродвижения с использованием

сверхпроводимости и магнитного подвеса». В настоящее время заведует кафедрой «Теоретические основы электротехники» ПГУПС. Имеет 480 печатных научных трудов, в том числе 200 патентов.

Ткачук Антон Андреевич

Родился в 1991 году. В 2013 году окончил Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I по специальности «Инженер-электромеханик». Аспирант кафедры «Теоретические основы электротехники» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I. Имеет 10 печатных трудов, в том числе 2 патента.

Kim Konstantin

Was born in 1958. He graduated from Leningrad Polytechnic Institute with specialization in «Engineering electrophysics». Doctor of engineering, professor. In 1998 he defended his doctoral dissertation on the topic «The electrodynamics of electrical propulsion systems using superconductivity and magnetic suspension». Currently he works as head of the department «Theoretical foundations of electrical engineering» at PGUPS. He is an author of 480 publications, including 200 patents.

Tkachuk Anton

Was born in 1991. In 2013 he graduated Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University majoring in «Electrical engineer». He is postgraduate student of the Theoretical Foundations of Electrical Engineering department of Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University. He has 10 published papers, including 2 patents.

Методика диагностирования электромеханического усилителя рулевого управления безредукторного типа

// Methods of diagnosis of the steering control type gearless electromechanical amplifier //

Денисов И.В., к.т.н.,
Смирнов А.А.,
ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет
имени А.Г. и Н.Г. Столетовых», г. Владимир

В статье предложена методика диагностирования электромеханического усилителя рулевого управления безредукторного типа, отличающаяся возможностью проведения контрольно-диагностических воздействий в два этапа: непосредственно на автомобиле и на стенде. Разработанный алгоритм отражает последовательность операций и их сущность для реализации задачи по установлению технического состояния мехатронного узла. Предложен комплексный показатель работоспособности для оценки степени пригодности усилителя к эксплуатации.

Ключевые слова: электромеханический усилитель рулевого управления, алгоритм диагностирования, комплексный показатель работоспособности.

Широкое распространение электромеханических усилителей рулевого управления в конструкции автотранспортных средств (АТС) потребовало разработки и уточнения нормативов их технического обслуживания в эксплуатации. Следует отметить, что диагностирование рассматриваемого узла является важной процедурой по установлению его технического состояния и формированию стратегии технических воздействий с целью обеспечения безотказности.

Производитель АТС предусматривает диагностирование электромеханического усилителя рулевого управления (ЭМУ РУ) с помощью сканер-тестера ДСТ-14М в соответствии с разработанным им алгоритмом, сущность которого заключается в определении кодов ошибок, возникающих в процессе эксплуатации. Недостатком данного метода является то, что он не позволяет отслеживать изменение технического состояния узла

The paper proposes a method of diagnosing the type of steering control gearless electromechanical amplifier, wherein the possibility of control and diagnostic actions in two stages: directly on the car and on the bench. The algorithm reflects the sequence of operations and their essence to implement the task of establishing the technical state of mechatronic unit. A comprehensive performance indicator for assessing the suitability for use of the amplifier.

Keywords: electromechanical power steering, the diagnosis algorithm, complex index of efficiency.

и его элементов, а следовательно, прогнозировать отказ системы. Вместе с тем многие отечественные и зарубежные ученые предлагают различные методики диагностирования ЭМУ РУ с использованием преимущественно стендовых испытаний. Для их реализации требуются демонтаж и последующий монтаж узла на автомобиль и нестандартное диагностическое оборудование. Это существенно увеличивает трудозатраты диагностических воздействий и к тому же не позволяет их реализовать в условиях СТОА ввиду отсутствия специальных приборов. Поэтому задача по разработке методики диагностирования ЭМУ РУ без его демонтажа с АТС является актуальной.

В настоящей работе предлагается методика экспресс-диагностирования электромеханического усилителя рулевого управления, включающая операции установления стандартных кодов ошибок и отслеживание изменения тех-

нического состояния узла по показателю работоспособности. Для осуществления разработанного комплекса действий требуется использование стандартных диагностических приборов: сканер-тестера, люфтомер-динамометра, мультиметра и амперметра.

Методика предполагает измерения следующих параметров: угла поворота рулевого колеса; момента, прикладываемого к нему при работающем и неработающем ЭМУ РУ (при включенном и выключенном зажигании); величины силы тока при воздействии на органы управления АТС. Амперметр предлагается включать в разрыв цепи предохранителя. Люфтомер-динамометр используется для фиксации момента и угла поворота рулевого колеса. Мультиметр необходим для проверки качества массировки цепи питания ЭМУ РУ.

Алгоритм, разработанный авторами статьи, показан на рис. 1.

Рассмотрим более подробно основные этапы диагностирования узла. Первый этап предполагает постановку автомобиля на пост диагностирования СТОА (блоки 1–3), подключение диагностического сканера и установление связи с электронным блоком управления ЭМУ РУ (блоки 4–7).

В случае, когда связь не установлена, выполняются мероприятия блоков 26–41 по проверке работоспособности бортового компьютера, напряжения питания, качества массировки и наличия обрыва электрических цепей. Указанные действия позволяют восстановить связь сканер-тестера с блоком управления (БУ) ЭМУ РУ, а в случае отсутствия результата БУ признается неисправным (блок 42).

Когда связь установлена, приступают к проверке наличия диагностической информации в памяти БУ (блоки 8–12), которую уточняют (блоки 13–18, 21–25) в случае повторного появления. В зависимости от кода ошибки (блоки 14

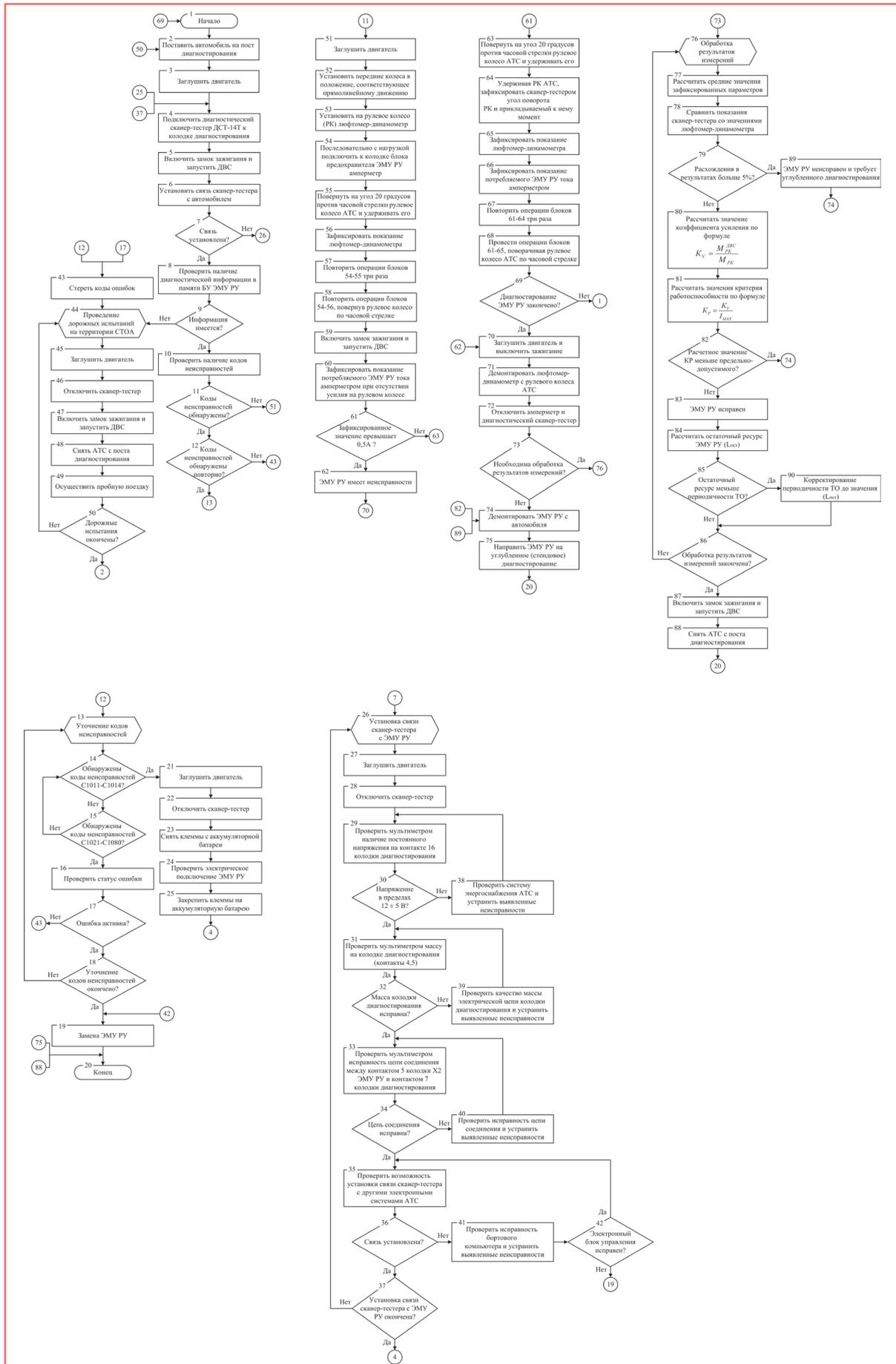


Рис. 1. Алгоритм диагностирования технического состояния безредукторного ЭМУ РУ.

и 15) принимают решение о замене ЭМУ РУ. Чтобы исключить случайность появления диагностической информации в памяти БУ, предполагаются удаление ошибок (блок 43) и проведение дорожных испытаний на территории СТОА (блоки 44–50). По окончании дорожных испытаний автомобиль вновь возвращается в зону диагностирования СТОА.

В случае отсутствия кодов ошибок в БУ ЭМУ РУ для формирования накопительной информации о фактическом техническом состоянии узла, а также его изменений в эксплуатации переходят к следующему этапу диагностирования.

В блоках 51–57 алгоритма содержатся операции по измерению угла поворота РК и момента, прикладываемого к нему при неработающем двигателе внутреннего сгорания (ДВС). После трехкратного повторения указанных действий (блок 58) приступают к фиксации амперметром потребляемого тока при отсутствии усилия на рулевом колесе (блоки 59–60). Если наблюдается превышение допустимого значения тока, равного 0,5 А (блок 61), то ЭМУ РУ имеет неисправности (блок 62), требует демонтажа с АТС и направления на углубленное диагностирование (блоки 70–75).

Углубленное диагностирование ЭМУ РУ проводят в соответствии с методикой работы [2], которая предполагает определение показателей работоспособности при стендовых испытаниях.

После фиксации указанных выше параметров приступают к их измерению при работающем ДВС (блоки 63–68). Особый интерес для диагноста представляет диагностическая информация о мгновенных значениях угла поворота РК и момента, прикладываемого к нему, которые получают с помощью сканер-тестера. Эти параметры также фиксируют с помощью люфтомер-динамометра и после обработки (блоки 76–77) сравнивают друг с другом (блок 78). При обнаружении расхождения, допустимое значение которого составляет 5% (блок 79), полагают наличие неисправностей в информационных элементах ЭМУ РУ или некорректных математических операций БУ (блок 89).

В работе [1] предлагается оценка технического состояния ЭМУ РУ по величине критерия работоспособности (КР), который определяют по формуле

$$\varphi = \frac{M_{\text{вых}} \cdot \eta}{I_{\text{max}} \cdot M_{\text{вх}}},$$

где $M_{\text{вых}}$ – момент силы, развиваемый усилителем; η – коэффициент полезного действия; $M_{\text{вх}}$ – момент, прикладываемый к рулевому колесу АТС; I_{max} – максимальный ток, потребляемый усилителем.

Получение параметров для расчета КР предполагает демонтаж ЭМУ РУ с автомобиля и проведение стендовых измерений. В приведенном алгоритме измерение коэффициента усиления (блоки 80–81) предлагается путем измерения усилия, прикладываемого водителем к РК при работающем ($M_{\text{РК}}^{\text{ДВС}}$) и неработающем ($M_{\text{РК}}$) ДВС. Таким образом, расчетная формула (1) будет трансформирована:

$$\varphi' = \frac{M_{\text{РК}}^{\text{ДВС}}}{I_{\text{max}} \cdot M_{\text{РК}}}.$$

Параметр φ' требует нормирования, которое авторы статьи проводят в настоящий момент. Предельное и допустимое значения КР следует использовать для оценки фактического технического состояния усилителя (блоки 82–83), прогнозирования остаточного ресурса узла (блоки 84–85) и корректирования периодичности технического обслуживания АТС по условию безотказности (блок 90).

После выполнения всех описанных процедур мастер-диагност СТОА получит возможность дать заключение о работоспособности ЭМУ РУ и рекомендации владельцу АТС по выполняемым техническим воздействиям с целью обеспечения безотказной эксплуатации и максимально полного использования ресурса.

Литература

1. Денисов И.В. Оценка технического состояния ЭМУ РУ ВАЗ-21703 с помощью критерия работоспособности / И.В. Денисов, А.А. Смирнов // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 11 (часть 12). – С. 2585–2588.
2. Денисов И.В. Планирование эксперимента по нормированию критерия работоспособности электромеханического усилителя руле-

вого управления автомобиля категории М1 / И.В. Денисов, Р.В. Нуждин, А.А. Смирнов // *Актуальные проблемы эксплуатации автотранспортных средств: материалы XVI Международной научно-практической конференции*. – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2014. – С. 62–66. ISBN 978-5-9984-0549-5.

Денисов Илья Владимирович

Родился в 1982 году. В 2004 году окончил ГОУ ВПО «Владимирский государственный университет» по специальности «Автомобили и автомобильное хозяйство». Кандидат технических наук. В 2007 году защитил диссертацию по теме «Разработка методики управления техническим состоянием рулевого управления переднеприводных автомобилей ВАЗ в условиях эксплуатации». Опыт работы – 12 лет. В настоящее время работает доцентом на кафедре «Автомобильный транспорт» ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых». Автор 109 научных публикаций.

Смирнов Алексей Александрович

Родился в 1989 году. В 2011 году окончил Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых по специальности «Управление качеством». В 2014 году окончил аспирантуру ВлГУ по направлению «Эксплуатация автомобильного транспорта». Имеет 31 научный труд.

Denisov Ilya

He was born in 1982. In 2004 he graduated from Vladimir State University majoring in «Automobiles and vehicle fleets». He is candidate of technical science. In 2007 he defended the thesis, the topic of thesis is «Methods elaboration of management of technical steering state of front drive vehicle VAZ cars in operation». He has 12 years of work experience. At present he works as associate professor of the «Automobile transport» department of Vladimir State University. He has 109 scientific publications.

Smirnov Alexey

He was born in 1989. In 2011 he graduated from Vladimir State University majoring in «Quality control». In 2014 he graduated from doctoral school of Vladimir State University in «Automobile transport operation» focus area. He has 31 scientific works.

Расчет и анализ схемы наблюдателя скорости двигателя постоянного тока

// The calculation and analysis of the speed of the observer scheme DC motor //

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

В статье рассмотрена схема наблюдателя скорости двигателя постоянного тока. Получены передаточные функции для ошибок наблюдателя по задающему воздействию и возмущению. Выполнено моделирование работы схемы наблюдателя при управляющем и возмущающем воздействиях. Проведен анализ схемы к вариациям ее звеньев.

Ключевые слова: двигатель, наблюдатель, ошибка, корректирующее звено, моделирование, вариации параметров, функция чувствительности.

Для сложных систем широко используют модальное управление [1]. В то же время подобные схемы требуют большого количества датчиков для построения модального регулятора, что существенно увеличивает их сложность. Кроме того, не все переменные состояния доступны для измерения. Поэтому многие координаты определяются косвенно с помощью специальных схем.

Двигатель постоянного тока (ДПТ) является одной из наиболее распространенных машин в регулируемом электроприводе. Это связано с простотой преобразователей и алгоритмов управления, линейностью характеристик и др. Для создания системы регулирования скорости с высокими техническими показателями (диапазон регулирования, быстродействие, точность) необходимо применение различных датчиков, в частности датчиков скорости. Это приводит к увеличению стоимости электропривода и усложнению его конструкции. Известны различные схемы, позволяющие решать эту задачу: контроль напряжения якоря $U_{я}$, схема тахометрического моста и другие. В настоящее время активно развиваются схемы, построенные на основе

Under consideration the scheme of speed observer for the DC motor. Obtained transfer functions for the observer errors for a given exposure and disturbance. The simulation accomplished for work of the observer scheme for the control and disturbance. Performed analysis of the scheme to the variations of its parts.

Keywords: motor, observer, error, correction unit, simulation, variation of parameters, sensitivity function.

наблюдательных устройств (НУ). НУ представляют собой модель объекта управления (его часть), которая работает в реальном времени. Особенностью этой модели является наличие корректирующих связей с реальными доступными координатами для оперативной настройки его под текущее состояние объекта.

Считаем, что доступными координатами электропривода являются напряжение якорной цепи $U_{я}$ и ток $I_{я}$. Ток якоря практически контролируется всегда и используется для защиты электропривода от перегрузки (токоограничение) и как дополнительная обратная связь в системе управления ДПТ. Структура наблюдателя приведена на рис. 1 [2]. Объект (ДПТ) представлен звеньями $W_1(p)$ и $W_2(p)$, которые характеризуются передаточными функциями:

$$W_1(p) = \frac{1/R_{я}}{T_{я}p + 1}; \quad W_2(p) = \frac{1}{Jp}, \quad (1)$$

где $R_{я}$ – сопротивление якорной цепи; $T_{я}$ – постоянная времени; J – момент инерции.

На звено объекта $W_1(p)$ поступают два сигнала: напряжение якорной цепи $U_{я}$ и ЭДС $E_{я}$. Схема наблюдателя содержит модель объекта $W_1'(p)$, узел сравнения Σ_1 и цепь настройки $W_3(p)$. Параметры звена $W_1'(p)$ выбираются из условия

$$W_1'(p) = W_1(p). \quad (2)$$

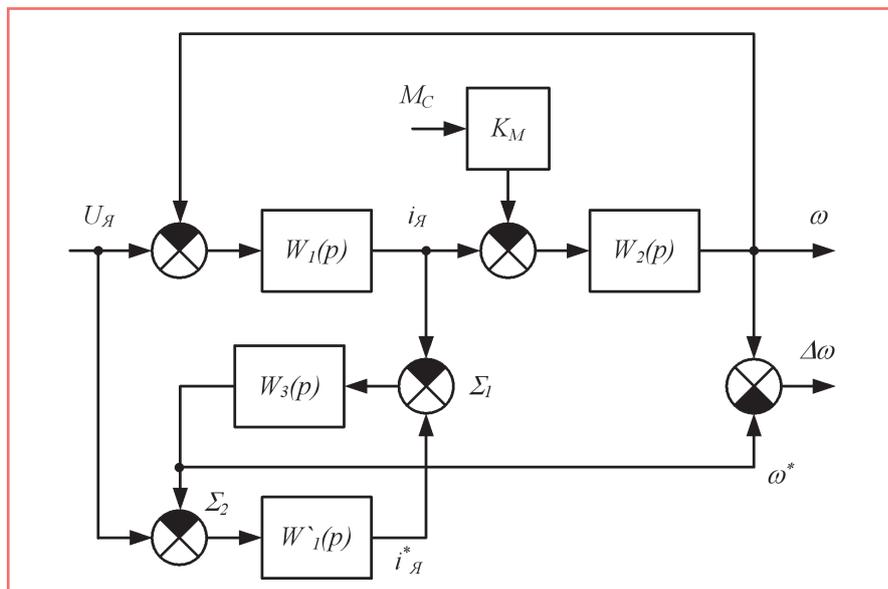


Рис. 1. Структурная схема ДПТ с наблюдателем скорости.

В соответствии со структурной схемой (рис. 1) можно составить уравнения и получить передаточные функции:

$$W_{\Delta\omega U}(p) = \frac{W_1(p)W_2(p) + W_3(p)[W_1'(p) - W_1(p)]}{[1 + W_1'(p)W_3(p)][1 + W_1(p)W_2(p)]}; \quad (3)$$

$$W_{\Delta\omega M}(p) = \frac{W_2(p) + W_2(p)W_3(p)[W_1'(p) - W_1(p)]}{[1 + W_1'(p)W_3(p)][1 + W_1(p)W_2(p)]}. \quad (4)$$

В выражениях (3–4) приняты обозначения:

$W_{\Delta\omega U}(p)$ – передаточная функция по ошибке наблюдателя при изменении $U_{Я}$;

$W_{\Delta\omega M}(p)$ – передаточная функция по ошибке наблюдателя при изменении M_C .

При соблюдении условия (2) получаем:

$$W_{\Delta\omega U}(p) = \frac{W_1(p)W_2(p)}{[1 + W_1'(p)W_3(p)][1 + W_1(p)W_2(p)]}; \quad (5)$$

$$W_{\Delta\omega M}(p) = \frac{W_2(p)}{[1 + W_1'(p)W_3(p)][1 + W_1(p)W_2(p)]}. \quad (6)$$

Передаточная функция $W_3(p)$ определяет статические и динамические характеристики переходного процесса. Определим условия, при которых он будет соответствовать настройке на технический оптимум [3]. Для этого необходимо, чтобы знаменатель формулы (3) представлял выражение

$$2T_\mu^2 p^2 + 2T_\mu p + 1. \quad (7)$$

Для того чтобы статическая ошибка $W_{\Delta\omega U}(p)$ была равна нулю, принимаем, что $W_3(p)$ – пи-регулятор:

$$W_3(p) = \frac{K_3(T_3 p + 1)}{T_3 p}. \quad (8)$$

Анализ знаменателя выражения (3) позволяет получить условие настройки регулятора:

$$T_3 = T_1. \quad (9)$$

При определенных допущениях можно получить выражение для расчета K_3 :

$$K_3 = \frac{K_2 T_1}{\sqrt{2T_1 K_1 K_2 - 1}}. \quad (10)$$

Из (10) видно, что для реализации настройки на технический оптимум необходимо, чтобы параметры неизменяемой части системы (T_1 , K_1 , K_2) удовлетворяли условию

$$2T_1 K_1 K_2 > 1. \quad (11)$$

В этом случае в формуле T_μ определяется выражением

$$T_\mu = \frac{\sqrt{2T_1 K_1 K_2 - 1}}{K_1 K_2}. \quad (12)$$

Была составлена модель электродвигателя с наблюдателем скорости

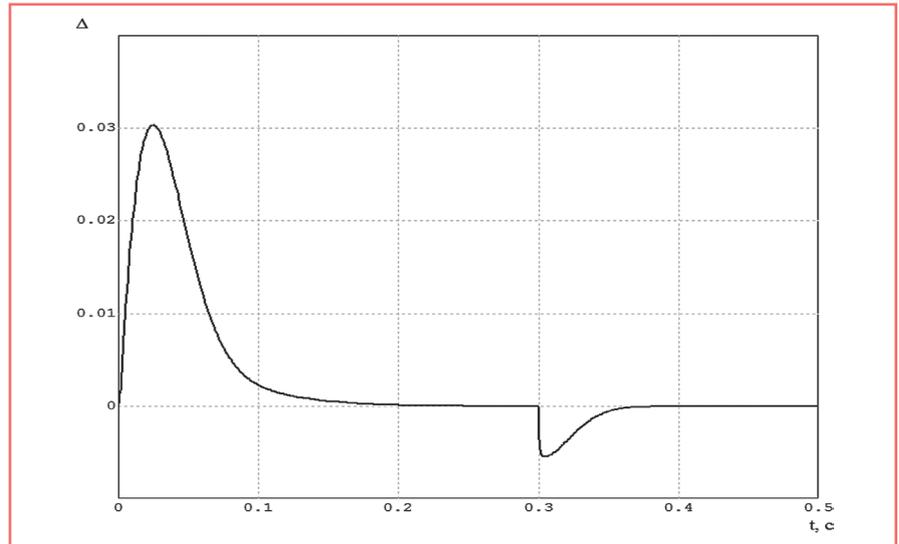


Рис. 2. Переходный процесс по ошибке.

с настройкой $W_{\Delta\omega U}(p)$ на технический оптимум. Переходный процесс по ошибке при управляющем и возмущающем воздействиях приведен на рис. 2.

Проведем анализ чувствительности схемы наблюдателя частоты вращения ДПП. Это связано с тем, что в процессе работы параметры объекта могут изменяться (нагрев обмотки, изменение состояния щеточно-коллекторного узла и др.). Необходимо оценить влияние этих изменений на работу НУ.

Определим чувствительность передаточной функции схемы наблюдателя к передаточным функциям $W_1(p)$ и $W_2(p)$. Она находится по формуле [4]:

$$S_{W_X}^{W_X} = \frac{dW(p)}{dW_X(p)} \frac{W_X(p)}{W(p)}, \quad (13)$$

где $W(p)$ – передаточная функция системы; $W_X(p)$ – передаточная функция звена системы, чувствительность к которому нужно определить.

В соответствии с формулами (5, 6, 13) найдем чувствительности:

$$S_{W_{\Delta\omega U}}^{W_1} = \frac{1 - W_1^2(p)W_2(p)W_3(p)}{[1 + W_1(p)W_3(p)][1 + W_1(p)W_2(p)]}; \quad (14)$$

$$S_{W_{\Delta\omega U}}^{W_2} = \frac{1}{1 + W_1(p)W_2(p)}; \quad (15)$$

$$S_{W_{\Delta\omega U}}^{W_3} = \frac{-W_1(p)W_3(p)}{1 + W_1(p)W_3(p)}. \quad (16)$$

Анализ выражений чувствительностей (14–16) показывает, что:

- на $S_{W_{\Delta\omega U}}^{W_2}$ не оказывает влияния звено $W_3(p)$;
- на $S_{W_{\Delta\omega U}}^{W_3}$ не оказывает влияния звено $W_2(p)$;

– звено $W_1(p)$ оказывает влияние на все чувствительности.

Таким образом, для стабильной работы наблюдателя скорости необходимо в первую очередь обеспечить постоянство параметров звена $W_1(p)$.

Рассмотрим ошибки передаточных функций (3, 4) от изменения параметров ДПП $R_{Я}$ и J_1 . Изменение сопротивления $R_{Я}$ может быть учтено с помощью коэффициента α :

$$W_1'(p) = \alpha W_1(p).$$

Статические ошибки δ определяются при условии $p \rightarrow 0$. В этом случае получаем

$$\delta_{\Delta\omega UR} = 0 \text{ и } \delta_{\Delta\omega MR} = \frac{\alpha - 1}{\alpha} R_{Я}. \quad (17)$$

Аналогично можно определить статические ошибки при изменении момента инерции J_1 . Принимаем, что

$$W_2'(p) = \beta W_2(p) \text{ и } W_1'(p) = W_1(p).$$

В этом случае

$$\delta_{\Delta\omega UJ} = \delta_{\Delta\omega MJ} = 0.$$

Динамические составляющие ошибок можно проанализировать с помощью моделирования исследуемой системы. На рис. 3, 4 приведены переходные процессы по управляющему и возмущающему воздействиям при различных значениях $R_{Я}$ и J_1 .

Из графиков (рис. 3, 4) видно, что:

- при изменении $R_{Я}$ появляется ошибка;
- при изменении J_1 переходные процессы практически не изменяются;
- время переходного процесса по возмущению приблизительно в 1,5 раза больше, чем по управлению.

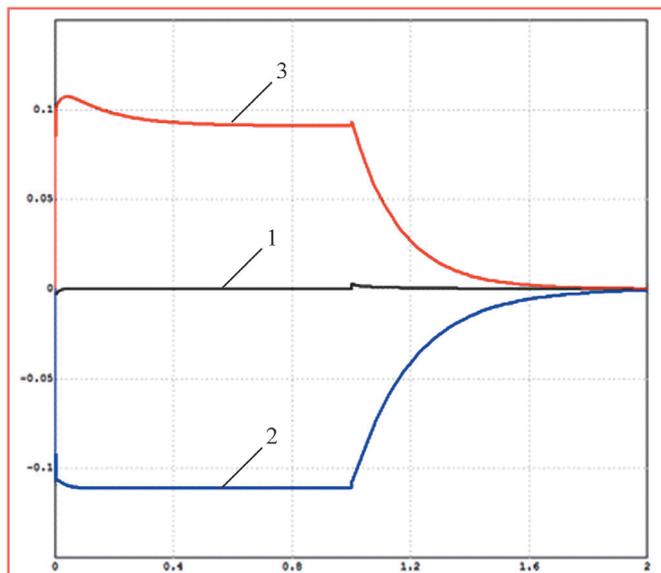


Рис. 3. Переходные процессы при изменении R_r :
1 – исходная система; 2 – $R_r' = 0.9 R_r$; 3 – $R_r' = 1.1 R_r$.

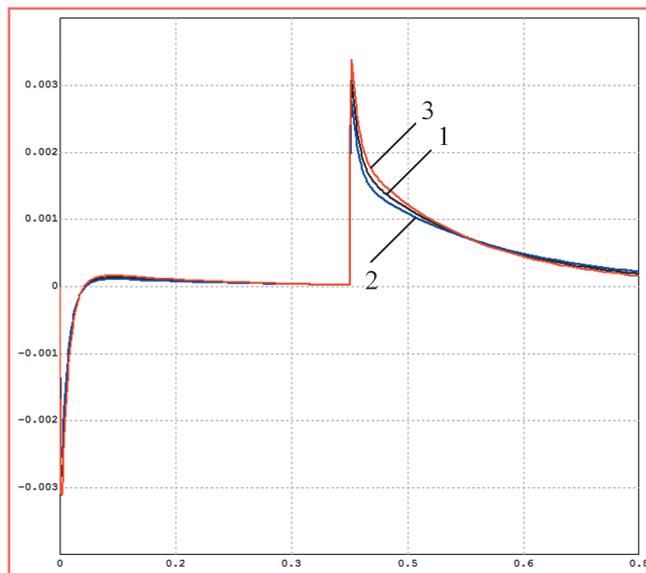


Рис. 4. Переходные процессы при изменении момента инерции:
1 – исходная система; 2 – $J' = 0.9 J$; 3 – $J' = 0.9 J$.

Литература

1. Кузовков Н.Т. Модальное управление и наблюдающие устройства. – М.: Машиностроение, 1976. – 214 с.
2. Анучин А.С. Системы управления электроприводов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – 373 с.
3. Справочник по автоматизированному электроприводе / под ред. В.А. Елисеева и А.В. Шинянского. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.
4. Розенвассер Е.Н. Чувствительность систем автоматического управления / Е.Н. Розенвассер, Р.М. Юсупов. – Л.: Энергия, 1969. – 208 с.

Доманов Виктор Иванович

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

Доманов Андрей Викторович

Родился в 1976 году. В 1999 году окончил Ульяновский государственный технический университет по специальности «Измерительно-вычислительные комплексы и системы». В 2002 году защитил кандидатскую диссертацию по теме «Разработка и исследование электроусилителя рулевого управления легковых автомобилей на основе бесконтактных двигателей». Кандидат технических наук, доцент, директор Экспертно-аналитического центра НИТИ им. С.П. Капицы УлГУ. Имеет 107 научных трудов, автор 11 изобретений.

Альтахер Аббас А. Карим

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

Доманов Виктор

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 144 scientific publications, author of 16 inventions.

Domanov Andrey

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

Altaher Abbas A. Karim

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

Определение положений коммутации вентильно-индукторного двигателя при регулировании среднего значения момента в зоне низких скоростей

// Definition of switching position of switched reluctance motors at control of average torque in the zone of low speeds //

Красовский А.Б., д.т.н., профессор,
МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

При регулировании среднего значения момента вентильно-индукторных двигателей пульсации момента наиболее заметны в зоне низких скоростей. В этой зоне фазные токи двигателя обычно принудительно ограничивают, поэтому за счет имеющегося запаса по напряжению при надлежащем выборе положений коммутации фаз можно в некоторых пределах влиять на форму фазных токов и за счет этого добиваться снижения пульсаций момента. В статье рассмотрены возможности снижения пульсаций момента при использовании наиболее распространенного способа ограничения фазного тока. Учитывая нелинейность процессов в двигателе, исследования проведены с использованием имитационного моделирования в среде MATLAB – Simulink. Приведено краткое описание особенностей модели. Найдены наилучшие условия коммутации для фиксированных значений уровней ограничения тока, определяемых из желаемых значений среднего момента двигателя, и при независимом изменении положений включения и отключения его фаз.

Ключевые слова: вентильно-индукторный двигатель, регулирование среднего момента, ограничение фазного тока в зоне низких скоростей, пульсации момента, имитационное моделирование, регулирование положений коммутации.

Постановка задачи

В электроприводах электротрансмиссий транспортных средств и ряда других механизмов на основе вентильно-индукторных двигателей (ВИД) часто используют регулирование не мгновенного, а среднего значения момента, которое значительно проще в реализации [1–5]. Однако при этом в силу специфики конструкции и работы ВИД могут возникать значительные пульсации момента

At regulation of average torque of switched reluctance motors torque ripple are most appreciable in a zone of low speeds. In this zone phase currents of the motors usually compulsorily limit, therefore at the expense of an available stock on pressure at an appropriate choice of positions of switching of phases it is possible to influence in some limits the form of phase currents and at the expense of it to achieve decrease in torque ripple. In this article possibilities of decrease in torque ripple are considered at use the most widespread a way of restriction of a phase current. Considering nonlinearity of processes in motors are spent with use of simulation modelling in the environment of MATLAB – Simulink. The short description of features of model is resulted. The best conditions of switching for the fixed values of levels of restriction of the current, defined of desirable values of the average torque of the motor, and independent change of positions of inclusion and switching-off of its phases are found.

Keywords: switched reluctance motor, control of average torque, limit of phase current in in the zone of low speeds, torque ripple, simulation, algorithms of control.

[2, 3, 6]. Наиболее заметно пульсации мгновенного момента ВИД M_{Σ} проявляются в зоне относительно низких скоростей ω . В этой зоне напряжение силового источника питания $U_{пит}$ обычно значительно превышает наводимую в фазе ЭДС, и для исключения чрезмерного увеличения фазного тока I_{ϕ} прикладываемое к фазе напряжение U_{ϕ} принудительно ограничивают. Поэтому за счет имеющегося запаса по напряжению при надлежащем выборе угловых положений ротора при включении $\Theta_{вкл}$ и отключении фаз $\Theta_{откл}$ можно изменять в некоторых пределах форму импульсов фазных тока I_{ϕ} и момента M_{ϕ} и за счет этого добиваться снижения пульсаций мгновенного момента.

Из всех возможных способов ограничения фазных токов ВИД наиболее часто используют импульсное токоограничение, получившее в литературе название current control. Ограничение I_{ϕ} на заданном уровне, необходимом для создания требуемого среднего значения момента ВИД, обеспечивается работой релейного регулятора с гистерезисом [7, 8]. Характерная кривая $I_{\phi}(\Theta)$, где Θ – текущая угловая координата ротора, при таком регулировании показана на рис. 1. Включение фазы происходит

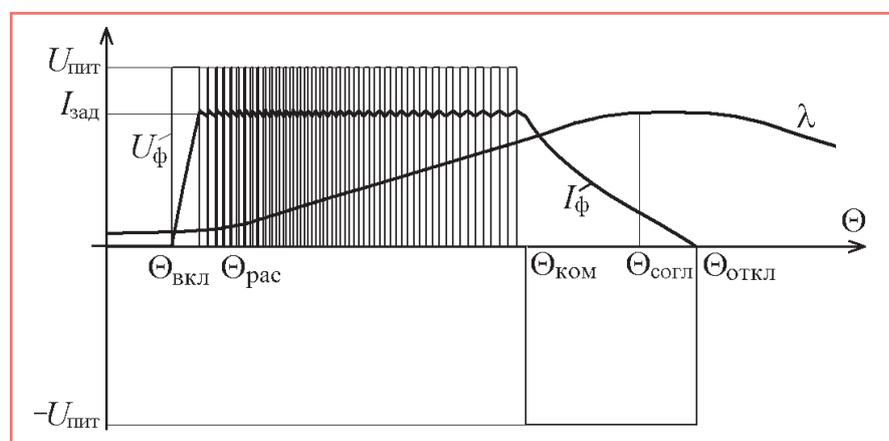


Рис. 1. Характерная кривая фазного тока при релейном регулировании по принципу current control.

в положении ротора $\Theta_{\text{вкл}}$ при подаче на нее импульса напряжения с амплитудой, равной напряжению силового источника питания $U_{\text{пит}}$ с некоторым угловым упреждением $\gamma_{\text{вкл}}$ относительно начала перекрытия взаимодействующих полюсов статора и ротора при угле $\Theta_{\text{рас}}$.

Ток $I_{\text{ф}}$ под действием повышенного напряжения форсировано нарастает до значения $I_{\text{зад}}$ и далее пульсирует относительно этого значения с некоторой амплитудой, задаваемой шириной зоны нечувствительности релейного регулятора. В первом приближении, приняв магнитную проводимость фазы λ на этом этапе неизменной и равной значению в положении начала перекрытия полюсов $\lambda_{\text{рас}}$, угловая длительность интервала включения фазы $\gamma_{\text{вкл}}$ определяется как

$$\gamma_{\text{вкл}} = \frac{\lambda_{\text{рас}} w^2 I_{\text{зад}} \omega}{U_{\text{пит}}}. \quad (1)$$

Чаще всего угловое положение $\Theta_{\text{вкл}}$ регулируют в функции скорости так, чтобы ток $I_{\text{ф}}$ достигал значения $I_{\text{зад}}$ в положении начала перекрытия полюсов $\Theta_{\text{рас}}$. Это условие позволяет определить $\Theta_{\text{вкл}}$ как

$$\Theta_{\text{вкл}} = \Theta_{\text{рас}} - \gamma_{\text{вкл}}. \quad (2)$$

Отключение фазы начинается в положении $\Theta_{\text{ком}}$ с угловым упреждением на интервал $\gamma_{\text{ком}}$ относительно начала полного перекрытия полюсов в положении $\Theta_{\text{согл}}$ при изменении полярности прикладываемого к ней напряжения амплитудой $-U_{\text{пит}}$ и длится до положения $\Theta_{\text{откл}}$, когда ток $I_{\text{ф}}$ спадает до нуля. На выбор положения $\Theta_{\text{ком}}$ влияет, прежде всего, число фаз ВИД, определяющее пространственный сдвиг кривых $\lambda(\Theta)$ соседних фаз. При наиболее простом и чаще других используемом алгоритме одиночной коммутации начала отключения работавшей фазы $\Theta_{\text{ком}}$ и включения следующей за ней фазы $\Theta_{\text{вкл}}$ совпадают. Однако при таком управлении из-за несогласованности изменения токов и моментов коммутируемых фаз обычно возникают значительные провалы и всплески в кривой мгновенного суммарного момента ВИД.

Поскольку в общем случае одно и то же значение $M_{\text{ср}}$ достижимо при разных сочетаниях управляющих воздействий, при определении их наилучшего сочетания необходимо использовать дополнительное ограничение – обеспечение требуемого значения $M_{\text{ср}}$ при минимуме пульсаций мгновенного момента. При рассматриваемом способе управления ВИД имеется возможность независимо

изменения как положений включения $\Theta_{\text{вкл}}$ и отключения $\Theta_{\text{ком}}$ фаз, так и уставки токоограничения $I_{\text{зад}}$. Кратко остановимся на наиболее известных из литературы примерах алгоритмов управления, реализующих в той или иной степени эти возможности для ограничения пульсаций момента ВИД.

В работе [9] рассмотрены алгоритмы согласованного изменения $\Theta_{\text{вкл}}$, $\Theta_{\text{ком}}$ и $I_{\text{зад}}$. Для достижения необходимого эффекта предложено в цикле коммутации каждой фазы значение $I_{\text{зад}}$ изменять по нелинейному закону. Этот метод управления, по сути, повторяет табличный метод задания кривых $I_{\text{ф}}$, рассмотренный выше.

В ряде работ рассматривают алгоритмы управления ВИД, в которых значение $I_{\text{зад}}$, определяемое с учетом требуемого значения $M_{\text{ср}}$, в пределах всего цикла коммутации фазы остается неизменным, а положения $\Theta_{\text{вкл}}$ и $\Theta_{\text{ком}}$ задаются из условия минимизации пульсаций момента. В одном из вариантов такого управления, рассмотренном в [10], положение $\Theta_{\text{вкл}}$ находится в соответствии с выражениями (1) и (2), а положение $\Theta_{\text{ком}}$ ищется компромиссным на основе результатов предварительного моделирования из двух условий – ограничения пульсаций момента и минимизации потерь в меди ВИД. По мнению авторов, наилучший результат достигается при отключении фаз в положениях $\Theta_{\text{ком}}$, совпадающем с положением $\Theta_{\text{рас}}$ включаемой фазы, для которой положение $\Theta_{\text{вкл}}$ определяется по соотношениям (1) и (2).

Безусловно, такой алгоритм управления ВИД значительно проще в реализации, чем предыдущий, однако с позиций минимизации пульсаций момента вызывает сомнения. Моделирование показывает, что у двигателя с типовой геометрией магнитной системы при таком управлении в кривых $M_{\Sigma}(\Theta)$ из-за особой формы перекрывающихся кривых $M_{\text{ф}}(\Theta)$ смежных фаз в большинстве случаев возникают значительно большие провалы и всплески, чем показанные на осциллограммах в статье. Это объясняется тем, что при задании положений $\Theta_{\text{вкл}}$ на основе выражений (1) и (2) фазы на интервале перемещения $\gamma_{\text{вкл}}$, то есть до начала перекрытия взаимодействующих полюсов, практически не создают момента. По этой причине при совпадении положений $\Theta_{\text{ком}}$ и $\Theta_{\text{вкл}}$ смежных фаз в кривой $M_{\Sigma}(\Theta)$ неизбежно присутствует весьма значительный

провал, который при определенных условиях затем сменяется не менее значительным всплеском. Отсюда следует, что для минимизации пульсаций момента положения $\Theta_{\text{ком}}$ и $\Theta_{\text{вкл}}$ смежных фаз должны регулироваться независимо.

Частично такой подход реализован в алгоритме, предложенном в [11], отличие которого состоит в том, что положение $\Theta_{\text{ком}}$ отключаемой фазы рассчитывается из условия, при котором кривые изменения потоков отключаемой и включаемой фаз, пересекаясь в некоторой точке, достигают в ней половины от своих максимальных значений в текущем цикле коммутации. Моделирование показало, что за счет большего углового перекрытия кривых $M_{\text{ф}}(\Theta)$ смежных фаз при таком алгоритме в некотором диапазоне изменения скорости и нагрузки можно достичь дополнительного снижения пульсаций момента. Однако и при этом алгоритме управления из-за чрезмерно большого упреждения включения фаз $\gamma_{\text{вкл}}$ также не достигаются наименьшие пульсации момента. В литературе можно найти и другие рекомендации для построения подобных алгоритмов, однако провести их критическое сопоставление сложно ввиду отсутствия данных о степени приближения при их использовании к режиму минимальных пульсаций.

Далее поставлена задача поиска наилучших условий коммутации ВИД, обеспечивающих минимальный размах ΔM для типовых режимов работы и сочетаний параметров ВИД при фиксированном значении $I_{\text{зад}}$ путем изменения только положений $\Theta_{\text{ком}}$ и $\Theta_{\text{вкл}}$, то есть за счет изменения угловых интервалов $\gamma_{\text{ком}}$ и $\gamma_{\text{вкл}}$.

Учитывая нелинейность процессов в ВИД, исследования и количественные оценки проведены с использованием имитационной модели в среде MATLAB – Simulink [12, 13].

Описание используемой модели

Модель построена на основе предположения, что без учета взаимного влияния фаз преобразование энергии в ВИД в общем виде описывается известными уравнениями электрического равновесия фаз

$$U_{\text{фк}} = I_{\text{фк}} R_{\text{фк}} + \frac{d\Psi_{\text{фк}}}{dt} \quad (3)$$

и уравнением электромагнитного момента

$$M_{\Sigma} = \sum_{k=1}^m \frac{\partial W'_{\text{фк}}}{\partial \Theta} \Big|_{I_{\text{фк}} = \text{const}}, \quad (4)$$

где $U_{\phi k}$, $I_{\phi k}$, $R_{\phi k}$, $\Psi_{\phi k}$ – напряжение, ток, активное сопротивление и потокосцепление k -й фазной обмотки ВИМ; $k = 1 \dots m$; m – число фаз ВИМ,

$$W'_{\phi k} = \int_0^{I_{\phi k}} \Psi_{\phi k} dI_{\phi k} - \text{коэнергия } k\text{-й обмотки.}$$

Для наиболее достоверного учета нелинейных свойств ВИД использованы экспериментальные магнитные характеристики типового 4-фазного двигателя с 6 полюсами на роторе и 8 полюсами на статоре, мощностью 6 кВт в виде функциональной связи между потокосцеплением Ψ , фазным током I_{ϕ} и положением ротора Θ . При использовании этих зависимостей фазный ток $I_{\phi}(\Theta)$ определяется непосредственно из этих характеристик, если предварительно установлена зависимость потокосцепления Ψ от положения ротора Θ , как это показано на функциональной схеме модели фазы ВИД на рис. 2. Напряжение на фазе $U_{\phi}(\Theta)$ в модели рассматривается как входное воздействие.

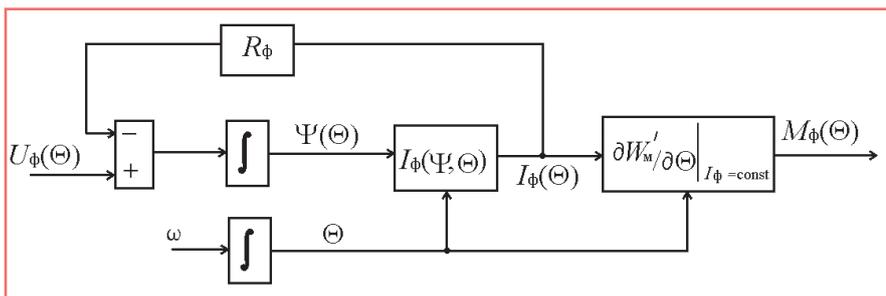


Рис. 2. Функциональная схема модели фазы ВИД при определении фазных тока и момента по многомерным таблицам.

Расчет кривой фазного момента $M_{\phi}(\Theta)$ непосредственно по выражению (2) ведет к громоздким вычислениям, поскольку $W'_{\phi k}$ или $L(I_{\phi}, \Theta)$ являются нелинейными функциями двух переменных – положения ротора Θ и фазного тока I_{ϕ} , причем ток I_{ϕ} также нелинейно зависит от Θ . Однако процедура определения $M_{\phi}(\Theta)$ в имитационной модели ВИД значительно упрощается, если указанные нелинейности рассматривать поочередно. Математически это интерпретируется следующим образом: исходная нелинейная зависимость $W'_{\phi k}(I_{\phi}, \Theta)$ представляется в виде произведения двух промежуточных нелинейных функций, например, α и β , каждая из которых зависит только от одной переменной, то есть

$$W'_{\phi k}(I_{\phi}, \Theta) = \alpha(I_{\phi})\beta(\Theta). \quad (5)$$

В результате процедура определения зависимости $M_{\phi}(\Theta)$ разделяется на два этапа.

На первом предварительном этапе с некоторым шагом задают ряд фиксированных значений фазного тока $I_{\phi i}$. Для каждого из значений $I_{\phi i}$, задаваясь приращением угла $\Delta\Theta = (\Theta_{j+1} - \Theta_j)$ с использованием соответствующих нелинейных магнитных характеристик ВИМ, определяют изменение коэнергии $\Delta W'_{\phi k}(I_{\phi i}, \Theta) = W'_{\phi k}(I_{\phi i}, \Theta_{j+1}) - W'_{\phi k}(I_{\phi i}, \Theta_j)$. Далее выражение для момента записывается в следующем виде:

$$M_{\phi}(I_{\phi i}, \Theta) = \left. \frac{\partial W'_{\phi k}(I_{\phi i}, \Theta)}{\partial \Theta} \right|_{I_{\phi i} = \text{const}} = \frac{\Delta W'_{\phi k}(I_{\phi i}, \Theta)}{\Delta \Theta}, \quad (6)$$

по которому определяется зависимость фазного момента от положения, соответствующая данному уровню фазного тока $M_{\phi}(I_{\phi i}, \Theta)$.

На втором этапе с использованием массива данных, определяющих стати-

коммулируемых фаз имеют горизонтальный участок в зоне перекрытия соответствующих полюсов статора и ротора в режиме без токоограничения. Амплитуда этого горизонтального участка является базовым значением для момента. Базовое значение тока соответствует границе перехода ВИД из линейного режима в режим с локальным насыщением полюсов. Далее все относительные величины помечены звездочкой (*) вверху.

При моделировании задавался режим стабилизации I_{ϕ}^* на некоторых промежуточных уровнях $I_{\phi \text{зад}}^*$ при различных значениях коэффициента форсировки K_{ϕ} – кратности превышения напряжения источника питания $U_{\text{пит}}$ над базовым значением напряжения $U_{\text{баз}}$, определенного ранее для режима voltage control. Для каждого конкретного сочетания $I_{\phi \text{зад}}^*$ и K_{ϕ} путем многократного повторения опытов находились наилучшие сочетания положений $\Theta_{\text{ком}}^*$ и $\Theta_{\text{вкл}}^*$, обеспечивающие минимальный размах пульсирующей составляющей момента ΔM^* , значение которого также фиксировалось. Использование коэффициента K_{ϕ} в качестве независимо варьируемого фактора вместо скорости позволяет более наглядно отразить влияние запаса по напряжению источника питания на исследуемые процессы.

В качестве примера на рис. 3 показаны результаты моделирования для трех характерных режимов работы ВИД. На рис. 3а показаны кривые фазных моментов $M_{\phi 1}^* - M_{\phi 4}^*$, суммарного момента M_{Σ}^* и среднего значения момента $M_{\text{ср}}^*$ в функции Θ^* для режима минимальных пульсаций при $I_{\phi \text{зад}}^* = 1$ и $K_{\phi} = 2$. Наименьший размах пульсаций $\Delta M^* \approx 24\%$ достигается при в 2 раза меньшем интервале упреждения включения фазы $\gamma_{\text{вкл}}^*$ по сравнению со значением, рассчитанным по соотношению (2), и интервале упреждения отключения работавшей фазы $\gamma_{\text{ком}}^* = 0,25$.

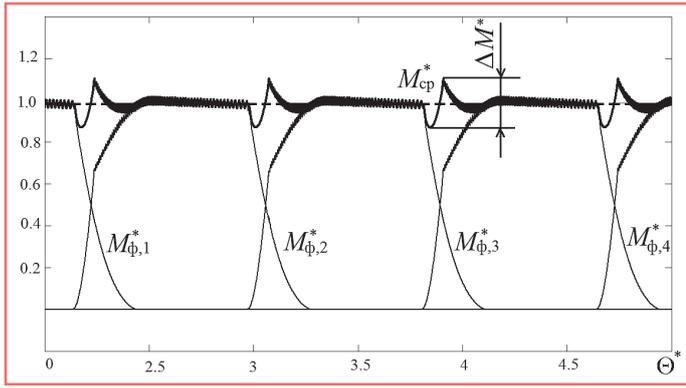
Обратим внимание на то, что нарастающие фронты импульсов фазных моментов имеют два характерных участка – начальный, относительно крутой участок, а за ним следует более пологий участок. Это объясняется двумя причинами: существенной нелинейностью зависимости $\lambda(\Theta)$ в окрестности положения $\Theta_{\text{рас}}$ и резким снижением среднего значения напряжения U_{ϕ} при переходе к режиму токоограничения. Как видно из рис. 3а, замедление роста фазных моментов на заключительном этапе

ческие угловые характеристики ВИМ $M_{\phi}(I_{\phi i}, \Theta)$ и найденной ранее зависимости $I_{\phi}(\Theta)$, находится искомая зависимость $M_{\phi}(\Theta)$.

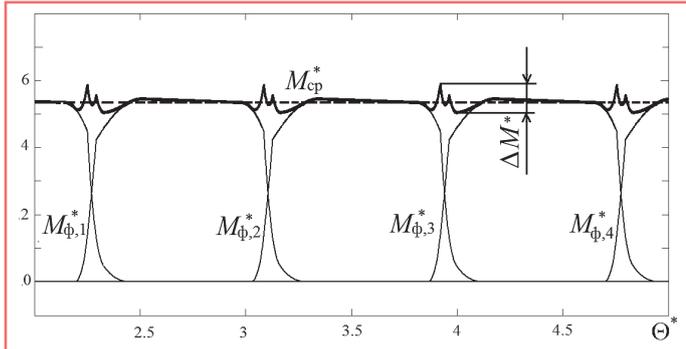
В контексте рассматриваемых вопросов наличие высокочастотной пульсирующей составляющей в кривых $I_{\phi}(\Theta)$ и $M_{\phi}(\Theta)$ принципиального значения не имеет, поэтому в целях упрощения ее можно не учитывать и считать, что на характерных интервалах перемещения в каждом цикле коммутации фазы напряжение U_{ϕ} неизменно и равно его среднему на данном интервале значению.

Результаты моделирования

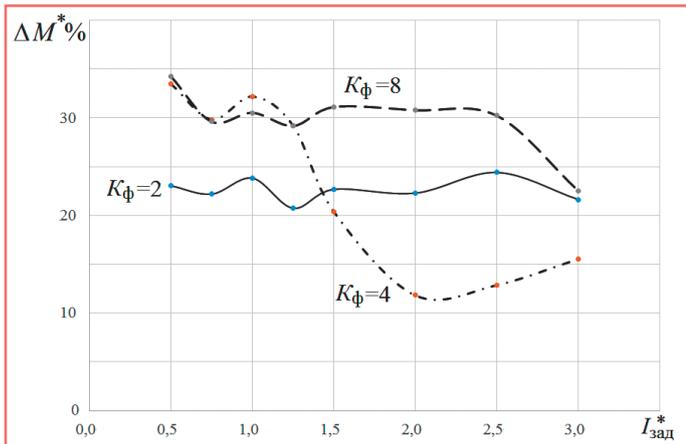
Моделирование проводилось в относительных единицах. За базовые значения напряжения на фазе U_{ϕ} и интервала включения $\gamma_{\text{вкл}} = \Theta_{\text{рас}} - \Theta_{\text{вкл}}$ приняты их значения, при которых моменты



а)

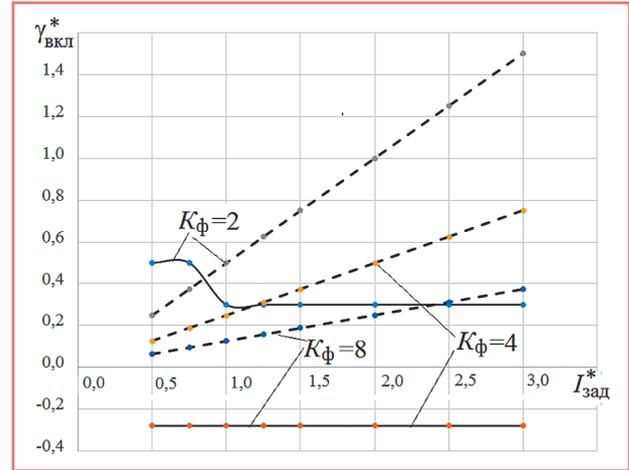


б)

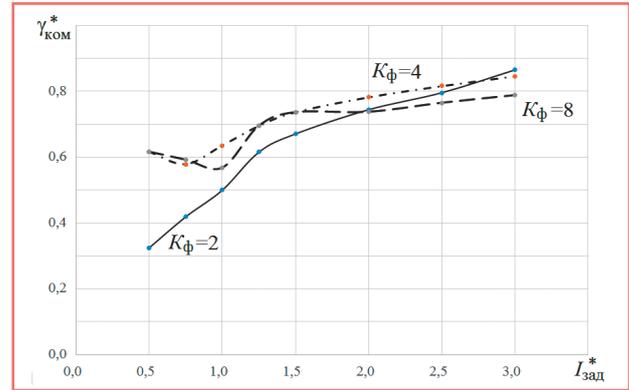


в)

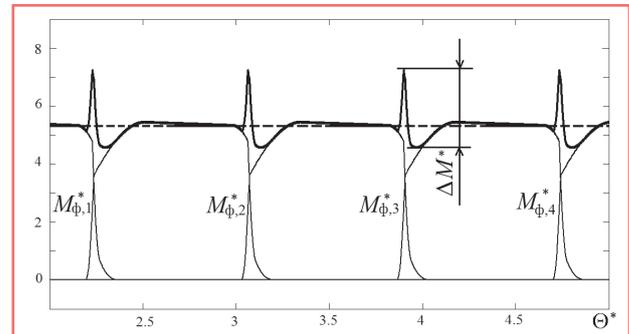
Рис. 3. Характер изменения фазных моментов, суммарного и среднего значений момента при различных положениях отключения фаз ВИД при управлении по принципу current control.



а)



б)



в)

Рис. 4. Зависимости $\gamma_{вкл}^*(I_{зад}^*)$, $\gamma_{ком}^*(I_{зад}^*)$, $\Delta M^*(I_{зад}^*)$ при разных значениях коэффициента K_{ϕ} для режима с наименьшим размахом пульсаций момента ВИД.

включения фаз в данном случае способствует уменьшению всплеска в кривой M_{Σ} и снижению размаха пульсирующей составляющей момента ΔM .

Увеличение значения коэффициента K_{ϕ} происходит с ростом запаса по напряжению источника питания. Это способствует увеличению темпа спадания фазных моментов при отключении фаз, и наличие более пологого участка в нарастающем фронте импульса фазного момента может стать причиной достаточно заметного провала в кривой $M_{\Sigma}(\Theta)$. Для снижения этого провала необходимо интервалы возбужденного состояния фаз смещать в сторону согласованного по-

ложения полюсов, а при определенных условиях включать фазы даже позже начала перекрытия полюсов. В частности, установлено, что при $I_{зад}^* = 3$ и $K_{\phi} = 4$ наименьший размах пульсаций $\Delta M^* \approx 16\%$ достигается при смещении положения $\Theta_{вкл}^*$ в сторону отставания относительно положения начала перекрытия полюсов $\Theta_{рас}^*$ на 0,28 от базового значения, то есть получаем $\gamma_{вкл}^* = -0,28$. Интервал упреждения отключения фаз при этом равен $\gamma_{ком}^* = 0,08$, то есть отключение фаз должно происходить практически в согласованном положении полюсов.

Соответствующие кривые фазных моментов $M_{\phi 1}^* - M_{\phi 4}^*$, суммарного мо-

мента M_{Σ}^* и среднего значения момента $M_{ср}^*$ показаны на рис. 3б. Заметим, что при определении положения $\Theta_{вкл}^*$ по выражениям (1) и (2) для этих условий получаем опережающее включение фаз при угловом сдвиге относительно положения $\Theta_{рас}^*$ на интервал $\gamma_{вкл}^* = 0,75$. При такой коммутации размах пульсаций значительно возрастает.

Для обобщения полученных результатов на рис. 4а, рис. 4б и рис. 4в показаны, соответственно, зависимости $\gamma_{вкл}^*(I_{зад}^*)$, $\gamma_{ком}^*(I_{зад}^*)$ и $\Delta M^*(I_{зад}^*)$, которые могут быть полезны для настройки алгоритмов управления. Для наглядности и сопоставления на рис. 4а пун-

нужно проверить рисунки 3в и 4в!!!

ктирными линиями показаны обычно используемые в алгоритмах управления зависимости $\gamma_{\text{вкл}}^*(I_{\text{зад}}^*)$, получаемые по соотношениям (1) и (2).

Важно подчеркнуть, что по мере роста темпов нарастания и спада кривых фазных моментов требования к точности установки соответствующих положений коммутации фаз, режиму минимальных пульсаций существенно возрастают, и незначительная погрешность в установке положения включения или отключения фаз может вести к резкому увеличению амплитуды пульсирующей составляющей момента. Это проиллюстрировано на рис. 3в, где представлены результаты моделирования для $I_{\text{зад}}^* = 3$ и $K_{\phi} = 8$. Предварительно установлено, что минимальному размаху пульсаций момента $\Delta M^* \approx 22\%$ соответствуют положения коммутации при $\gamma_{\text{вкл}}^* = -0,28$ и $\gamma_{\text{ком}}^* = 0,12$. Однако при сдвиге положения отключения фаз в сторону отставания всего на $0,02$, то есть при $\gamma_{\text{ком}}^* = 0,10$, как видно из рис. 4в, размах пульсирующей составляющей момента становится значительно больше и составляет уже около $\Delta M^* \approx 51\%$. Таким образом, можно предположить, что при значениях K_{ϕ} около 10 и более обеспечение режима наименьшего размаха пульсирующей составляющей становится практически трудно реализуемым.

В заключение необходимо отметить, что решение проблемы ограничения пульсаций момента в ВИД является, безусловно, одной из важнейших задач, от всестороннего решения которой во многом зависит успешность продвижения очень перспективного типа электропривода в те области промышленности, в которых пока еще безраздельно господствуют традиционные приводы непрерывного движения. В рамках этой статьи затронуты только один из аспектов этой проблемы и самые общие и очевидные подходы к ее решению.

Выводы

1. Исследования показали, что при ограничении фазных токов ВИД в области относительно низких скоростей за счет имеющегося запаса по напряжению при надлежащем выборе угловых положений включения и отключения фаз можно изменять в некоторых пределах форму импульсов фазных токов и мо-

ментов и за счет этого добиваться снижения пульсаций мгновенного момента.

2. При использовании токоограничения по принципу current control наибольшее снижение пульсаций момента достигается при независимом регулировании по определенному алгоритму положений включения и отключения его фаз. По мере роста запаса по напряжению силового источника питания интервал возбужденного состояния фаз необходимо смещать в сторону согласованного положения полюсов, а при определенных условиях включать фазу даже позже начала перекрытия полюсов. Однако при этом возрастают требования к точности установки соответствующих положений коммутации фаз, поскольку при росте темпов нарастания и спада фазных моментов незначительная погрешность в установке этих положений может вести к резкому увеличению амплитуды пульсирующей составляющей момента.

Литература

1. Никифоров Б.В., Пахомин С.А., Птах Г.К. Вентильно-индукторные двигатели для тяговых электроприводов // *Электричество*. – 2007. № 2 – С. 34–38.
2. Miller T.J.E. *Electronic control of switched reluctance machines*. – Oxford: Newnes, 2001. – 272 p.
3. Krishnan R. *Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, design, and applications* // CRC Press LLC. 2001. – 432 p.
4. He Cheng, Hao Chen, Zhou Yang. Average torque control of switched reluctance machine drives for electric vehicles. *IET Electric Power Application* 2015. Volume: 9, issue: 7, pp. 459–468, DOI: 10.1049/iet-epa.2014.0424.
5. Hannoun H., Hilairt M., Marchand C. Comparison of instantaneous and average torque control for a switched reluctance motor. 2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Year: 2008, pp. 675–680, DOI: 10.1109/ISIE.2008.4677059.
6. Красовский А.Б. Ограничение пульсаций момента в вентильно-индукторном электроприводе средствами управления // *Вестник МГТУ, серия «Машиностроение»*, № 2, 2001. С. 99–113.
7. Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В., Кваснюк А.А. *Силовая электроника*. Издательский дом МЭИ, 2007, 632 с.
8. Козаченко В.Ф., Пискунов А.Г., Красовский А.Б., Грудинин В.С. Принципы построения инверторов для шагового электроприво-

да с электрическим дроблением шага // *Электротехническая промышленность. Серия «Электропривод»*. – 1984. – № 10. – С. 1–4.

9. Пахомин С.А., Киреев А.В. Пульсации момента тягового реактивного двигателя в режиме ограничения тока // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. 2004, № 1, с. 25–28.

10. Shahabi, A. Rashidi and S.M. Saghaian-Nejad. Torque Ripple Reduction of SRM Drives Below the Base Speed Using Commutation Angles Control. 21st Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE) 2013. pp. 1–6, DOI: 10.1109/IranianCEE.2013.6599798/.

11. Mademlis C., Kioskeridis I. Performance optimization in switched reluctance motor drives with online commutation angle control. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 18, no. 3, pp. 448–457, sept. 2003.

12. Красовский А.Б. Применение имитационного моделирования для исследования вентильно-индукторного электропривода // *Электричество*. – 2003. – № 3. – С. 35–45.

13. Красовский А.Б. Имитационные модели тягового вентильно-индукторного электропривода для решения типовых задач проектирования // *Известия вузов. Машиностроение*. – 2012. – № 12. – С. 26–33.

Красовский Александр Борисович

Родился в 1954 году. В 1977 году окончил Московский энергетический институт по специальности «Электропривод и автоматизация промышленных установок». Доктор технических наук, профессор. В 2004 году защитил диссертацию по теме «Имитационные модели в теории и практике вентильно-индукторного электропривода». Опыт работы – 32 года. В настоящее время работает заведующим кафедрой электротехники и промышленной электроники МГТУ им. Н.Э. Баумана. Имеет около 100 научных работ, включая 18 изобретений.

Krasovskiy Alexander

He was born in 1954. In 1977 he graduated from Moscow Institute of Energy majoring in «Electric motor and automation of industrial plants». He is doctor of technical science, professor. In 2004 he defended the thesis, the thesis topic is «Simulation models in the theory and practice of valve-inductor electric drive». He has 32 years of work experience. At present he works as head of electric technics and industrial electronics department at Moscow State Technical University. He has 100 scientific papers, including 18 inventions.

Методы анализа электромагнитной совместимости

// Methods of analysis of electromagnetic compatibility //

**Аполлонский С.М., д.т. н., профессор,
ООО «Центр электромеханотроники», г. Санкт-Петербург**

**Горский А.Н., д.т. н., профессор,
ФГБОУ ВО ПГУПС, г. Санкт-Петербург**

В настоящее время все большее число высокочувствительных электромагнитных элементов для своего надежного функционирования требуют решения тех или иных задач электромагнитной совместимости. Обеспечение совместной работы различных видов электрооборудования в ограниченных по объему помещениях приобретает первостепенное значение. В статье приводятся методы анализа электромагнитной совместимости: аналитические методы анализа электромагнитных полей (ЭМП) отдельных источников, группы источников, средства защиты от опасных воздействий ЭМП, возникающие контактные помехи. В настоящее время при широком использовании информационных технологий эти задачи могут быть решены более эффективно.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, электромагнитное поле, электромагнитная среда, энергетическое помещение, источники, рецепторы, коэффициенты взаимовлияния, электрические и магнитные экраны, контактные помехи.

Совместимость в технической системе

Под совместимостью обычно понимают способность двух или более технических элементов работать совместно, с высокой степенью эффективности и надежности. Совместимость может быть разной: акустическая, электротехническая, электромагнитная, тепловая и т.д.

Под электромагнитной совместимостью (ЭМС) технических средств понимают [1, 8] способность технических средств функционировать одновременно с требуемым качеством в реальных условиях эксплуатации при воздействии на них непреднамеренных

Currently, a growing number of highly sensitive electromagnetic elements for their reliable operation require solving various problems of electromagnetic compatibility. Ensuring simultaneous working of various types of electrical equipment in the limited-volume areas of paramount importance. The article presents the methods of analysis of electromagnetic compatibility: analytical methods for the analysis of electromagnetic fields of singular sources, groups of sources, optimal placement of sources and receptors in a confined space, ways of protection from harmful effects of electromagnetic fields, created by contact noise. At present with widespread use of information technologies, these problems can be solved more efficiently.

Keywords: electromagnetic compatibility, electromagnetic field, electromagnetic environment, energy room, sources, receptors, coupling factors, electrical and magnetic shields, contact noise.

электромагнитных помех и не создавать недопустимых электромагнитных помех другим электротехническим средствам. Обеспечение нормальной работы совместно функционирующих технических средств является целью ЭМС как научной проблемы. Предметом изучения можно считать определение причин (электромагнитных помех), мешающих нормальной работе рассматриваемых технических средств.

В электроэнергетической системе, по условиям размещения и эксплуатации, устанавливается разнородное электрооборудование. Это, прежде всего, силовое электрооборудо-

вание, являющееся источником постоянных электрических и магнитных полей, а также электромагнитных полей широкого частотного спектра. К нему относят электрические машины, кабели, распределительные щиты, трансформаторы, статические и электромагнитные преобразователи и др. Рядом с силовым электрооборудованием размещается и слаботочное: пульты управления, системы автоматики, информационные линии, приборы и компьютерные устройства, блоки электроники и радиотехническое оборудование, которые в основном являются приемниками (рецепторами) электромагнитного поля. В ряде случаев один и тот же элемент электрооборудования может быть как источником поля, так и рецептором. В результате перекрестного влияния электромагнитных полей в помещении создается электромагнитная среда, обладающая определенными электрической и магнитной напряженностями. Эта электромагнитная среда может быть существенно скорректирована воздействием непреднамеренных помех, которые могут воздействовать на рецепторы, изменяя их параметры и режимы работы. Такое воздействие осуществляется двумя способами: магнитной и электрической индукциями. В первом случае воздействие помехи на рецептор можно рассматривать как связь между двумя электрическими цепями или, в общем случае, как связь между двумя электромагнитными системами, имеющими общее магнитное поле. Во втором случае воздействие помехи на рецептор можно рассматривать как связь между двумя электрическими системами, имеющими общее электрическое поле.

Там, где размеры помещения лимитированы, размещение электрооборудования диктуется размерами помещения, удобствами компоновки и эксплуатации, а также традиционно сложившимися представлениями о це-

лесообразности тех или иных структур. Поэтому будем исходить из того, что электрооборудование закреплено на определенных местах. После расчета напряженностей ЭМП от каждого из элементов энергетической зоны помещения можно составить диаграммы напряженностей поля в каждой точке помещения для различных режимов работы электрооборудования. Анализ таких диаграмм позволит выявить зоны с экстремальными напряженностями ЭМП. Размещение рецепторов осуществляют в зонах с минимальными напряженностями поля. Если напряженности ЭМП в этих зонах все-таки выше допустимых, применяют экранирование или специальные проектирование и размещение электрооборудования.

Анализ электромагнитной среды в энергетическом помещении

Под энергетическим помещением понимают область помещения или пространства, в которой нельзя пренебречь электромагнитными полями, создаваемыми находящимся в ней электрооборудованием.

Анализ электромагнитной среды включает в себя оценку напряженностей электрического \vec{E}_j и магнитного \vec{H}_j полей на стадии проектирования и рекомендации по снижению их до нормативных величин. В процессе эксплуатации должен осуществляться систематический контроль напряженностей \vec{E}_j и \vec{H}_j в характерных точках помещения \vec{Q}_j .

Как правило, рассматриваемый технический объект состоит из многих элементов, строгий учет полей которых весьма затруднителен и не всегда необходим. Не все источники равнозначны в создании результирующего электромагнитного поля помех. Поэтому вначале выявляются наиболее интенсивные источники ЭМП. Это можно сделать, учитывая мощности источников, геометрические размеры и частотный диапазон. Затем производится расчет ЭМП отдельных источников в заданном диапазоне режимов работы. Аналитическими или численными методами определяются составляющие электрических и магнитных напряженностей ЭМП в окружающей источнику среде.

Аналитические методы позволяют определить напряженности электрического и магнитного полей и потенциалы в любой точке рассматриваемого про-

странства путем непосредственного решения уравнений Максвелла или уравнений Лапласа и Пуассона. При этом более простой путь решения задачи зависит от выбора системы координат и выбранного метода расчета. Основное достоинство аналитических методов заключается в том, что при заданной конфигурации системы заряженных тел их геометрические размеры и расстояния между ними могут быть различны. Различными также могут быть и интенсивности источников (заряды и токи). К аналитическим методам относят:

- **метод участков**, в котором потенциал электрического и магнитного полей рассматриваемого объекта находится суммированием потенциалов от отдельных заряженных элементов этого объекта;
- **метод средних потенциалов (метод Хюу)**, в котором действительное неравномерное распределение заряда по поверхности заменяется равномерным (но при этом потенциал распределяется по поверхности неодинаково);
- **метод разделения переменных**, основанный на представлении решения уравнения Лапласа, являющегося в общем случае функцией трех координат в виде произведения функций, каждая из которых зависит только от одной координаты;
- **метод комплексного потенциала (метод конформных отображений)**, заключающийся в преобразовании сложных форм граничных поверхностей в более простые, для которых решение может быть найдено относительно легко. Преобразование производится с помощью аппарата теории функций комплексного переменного;
- **метод зеркальных изображений**, применяемый в случаях, когда границами поля являются плоские или цилиндрические поверхности. В методе влияние границы на исследуемое поле заменяется влиянием дополнительной системы зарядов (или токов, в зависимости от рассматриваемой задачи). При этом место расположения зарядов (токов), их величина и характеристика среды определяются граничными условиями.

Аналитические расчеты выполняются на основе замены реальных источников математическими моделями катушки, сферы, цилиндров, диполей, квадрупольей и др. Например, двухпо-

люсные электрические машины создают внешние электромагнитные поля дипольного типа, четырехполюсные – квадрупольного типа и т.д.

Если источники разнесены на большие расстояния друг от друга, можно при расчете использовать метод наложения – суммировать поля от отдельных источников. Так как суммирование производится с векторными величинами, то практически складываются составляющие напряженностей по осям координат:

$$H_{q\beta} = \sum_i H_{q\beta}^{(i)}; E_{q\beta} = \sum_i E_{q\beta}^{(i)}, \quad i \in [1, N]. \quad (1)$$

Значения \vec{E} и \vec{H} , определяемые, например, через проекции на оси прямоугольной системы координат, равны:

$$\vec{H} = \vec{i}H_x + \vec{j}H_y + \vec{k}H_z; \vec{E} = \vec{i}E_x + \vec{j}E_y + \vec{k}E_z$$

где $H_{q\beta}, E_{q\beta}$ – составляющие магнитной и электрической напряженностей суммарного поля по осям; $q\beta, q$ – система координат (прямоугольная, цилиндрическая, сферическая); β – обозначение оси (например, в прямоугольной системе – $q\beta - x, y, z$); i – порядковый номер источника, создающего ЭМП.

Численные методы, в отличие от аналитических, позволяют решить задачу при заданных интенсивностях источников и заданных геометрических размерах. Стоит изменить одну из заданных величин и нужно решать задачу снова. Целесообразнее применять методы, которые позволяли бы оценивать полученное решение, что позволило бы вносить изменения в исходные данные с целью получения наилучшего результата. Это должны быть **комбинированные методы**, позволяющие получить решение с помощью информационных технологий и в то же время позволяющие оценить полученный результат и выявить имеющиеся закономерности, влияющие на конечный результат.

Примером применения такого метода является расчет поля по картине поля, построенной с помощью программного комплекса ELCUT. Картина полученного плоскопараллельного поля обладает наглядностью и универсальностью. В силу известной аналогии картина электрического поля может быть использована для расчета магнитного поля при их одинаковой конфигурации.

Таблица 1. Подобие электрического и магнитного полей одинаковой геометрии.

	Электрическое поле	Магнитное поле
Поле уединенного провода	$\varphi = -\frac{\tau}{2\pi\epsilon} \ln r + const$ $E = \frac{\tau}{2\pi r \epsilon}$	$A = -\frac{\mu I}{2\pi} \ln r + const$ $H = \frac{I}{2\pi r}$
Поле двух проводов	$\varphi = \frac{\tau}{2\pi\epsilon} \ln \frac{b}{a}$ $E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon} \frac{c}{ab}$	$A = -\frac{\mu I}{2\pi} \ln \frac{b}{a}$ $H = \frac{I}{2\pi} \frac{c}{ab}$

Таблица 2. Соответствие характеристик плоскостепенного электрического и магнитного полей одинаковой геометрии.

Электрическое поле	ρ	φ	ϵ	\vec{E}	\vec{D}	τ	C'
Магнитное поле	J_z	A_z	$1/\mu$	\vec{B}	\vec{H}	I	L'

Рассмотрим этот вопрос подробнее.

Выражения для электрического потенциала и напряженности электрического поля уединенного заряженного провода и тех же значений для электрического поля двух заряженных проводов приведены в таблице 1. Там же приведены значения магнитного потенциала и напряженности магнитного поля в магнитном поле постоянных токов для уединенного провода и поля двух проводов. Из таблицы видно, что указанные значения подобны. В выражениях, приведенных в таблице, обозначено: φ – электрический потенциал; A – магнитный потенциал; τ – линейная плотность заряда; I – величина постоянного тока; r – расстояние от центра провода до рассматриваемой точки; ϵ – диэлектрическая проницаемость; μ – магнитная проницаемость. В поле двух проводов: b – расстояние от второго провода до рассматриваемой точки; a – расстояние от первого провода до рассматриваемой точки; c – расстояние между проводами.

Сравнивая уравнение Пуассона для плоскостепенного магнитного поля

$$\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} = -\mu J_z$$

с уравнением Пуассона для плоскостепенного электрического поля

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = -\frac{\rho}{\epsilon},$$

можно видеть, что при аналогичном распределении токов $J_z(x, y)$ и зарядов $\rho(x, y)$ решения будут аналогичны. Составляющие вектора магнитной индукции с учетом $A_x = A_y = 0$ в этом случае равны:

$$B_x = \frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} = \frac{\partial A_z}{\partial y};$$

$$B_y = \frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} = -\frac{\partial A_z}{\partial x};$$

$$B_z = 0.$$

Составляющие вектора напряженности электрического поля:

$$E_x = -\frac{\partial \varphi}{\partial x}; E_y = -\frac{\partial \varphi}{\partial y}; E_z = 0.$$

Отсюда следует соответствие, приведенное в таблице 2.

В таблице 2 значения C', L' – емкость и индуктивность на единицу длины; D и B – значения вектора электрической и магнитной индукций. Линии векторов \vec{E} и \vec{B} будут взаимно перпендикулярны. Причем, так как

$$B_x = \frac{\partial A_z}{\partial y}; E_x = -\frac{\partial \varphi}{\partial x} \text{ и}$$

$$B_y = -\frac{\partial A_z}{\partial x}; E_y = -\frac{\partial \varphi}{\partial y},$$

то на месте линий напряженности электрического поля будут линии равного магнитного потенциала φ_M , а на месте линий равного электрического потенциала будут линии магнитной индукции.

Определение напряженностей \vec{E} и \vec{H} результирующего электромагнитного поля в заданной области на основе уравнений Максвелла при наличии точных математических моделей, описывающих ЭМП каждого из источников, лежит в основе **электродинамического метода**, когда известна геометрия помещения, источников и их расположения, а также материалы, из которых они изготовлены.

Существуют и другие методы анализа ЭМС.

Энергетический метод может быть использован, когда известна мощность, которая может выделиться в источнике в квазистатическом или динамическом режимах его работы. Возможность выхода из строя приемника может оцениваться по выделенной в нем тепловой энергии, которая приводит к необратимым последствиям. Полученные с помощью энергетического метода результаты менее достоверны, чем при использовании электродинамического метода, и в большинстве случаев могут быть использованы при качественных оценках.

Вероятностный метод эффективен при исследовании динамических режимов работы электротехнических комплексов, в том числе при коротких замыканиях, перенапряжениях от воздействия сторонних источников (молний, электромагнитного импульса ядерного взрыва и т.д.). Полученные этим методом результаты также используются для качественных оценок.

В ряде случаев более эффективным путем получения информации о величинах \vec{E}_i и \vec{H}_i в заданных точках \vec{Q}_i является метод **физического моделирования**. В этом методе реальное энергетическое помещение с размещенным оборудованием (исходная система – реальный объект) заменяется моделью (модельная система – вспомогательный объект), находящейся в определенном соответствии с оригиналом. При таком подходе к исследованию необходимо обеспечить определенные условия подобия. Добиться строгой пропорциональности геометрических характеристик оригинала и модели не всегда удается. Особенно в тех случаях, когда оригиналы и модели для отдельных видов электрооборудования не являются геометрически подобными, в частности, ограниченными разного рода геометрическими поверхностями. В таких случаях при переходе от оригинала к модели можно использовать теоремы сложения [2], с помощью которых учесть разницу в кривизне поверхности и оригинала.

Во многих случаях при замене оригинала моделью можно это делать приближенно: если размеры оригинала по всем координатным осям отличаются незначительно, целесообразно заменять их сферическими моделями (прямоугольные, в форме куба, цилиндры, у которых D и L отличаются незначительно). Эквивалентная сферическая форма должна иметь примерно равный

объем. Если размеры по двум координатным осям отличаются незначительно, а по третьей существенно их превышают, реальный объект можно заменить цилиндрической моделью. Расчеты ЭМП тел различной формы показывают, что возникающие из-за неровностей поверхностей неоднородности влияют на результирующее поле на расстояниях порядка геометрических размеров неоднородностей [3].

По мере приближения источников друг к другу при высоких частотах или кратковременных импульсах появляется необходимость учитывать их взаимное влияние (например, отражения и переотражения ЭМП на соседних элементах). Согласно [1] при $L_{i-k} \in [10, \infty] 2\ell_{i,k}$ можно воспользоваться формулами (1), при $L_{i-k} \in [5, 10] 2\ell_{i,k}$ использование (1) приводит к погрешности 5–15%, при $L_{i-k} \in [2, 5] 2\ell_{i,k}$ учет взаимовлияния необходим безусловно. Здесь L_{i-k} – расстояние между i -м и k -м источниками; $2\ell_{i,k}$ – диаметр наименьшего выпуклого тела, описанного около i -го или k -го источника.

При необходимости учета взаимовлияний значения \vec{H}_j и \vec{E}_j определяются по формулам (1) с учетом коэффициентов взаимовлияния (K):

$$H_{q_\beta} = \sum_i K_{q_\beta(N-1)}^{SM(i)} H_{q_\beta}^i, \\ E_{q_\beta} = \sum_i K_{q_\beta(N-1)}^{S\Delta(i)} E_{q_\beta}^i, \quad (2)$$

где $\vec{H}_{q_\beta}^{(i)}$, $\vec{E}_{q_\beta}^{(i)}$ – значения, вычисленные по формулам (1); $K_{q_\beta(N-1)}^{SM(i)}$, $K_{q_\beta(N-1)}^{S\Delta(i)}$ – составляющие функций взаимовлияния по осям q_β , соответственно, для магнитной (M) и электрической (Э) напряженностей, учитывающих влияние 1, 2... N-1 источников на поле i -го источника; индекс S – вид поверхности (сфера, цилиндр и др.).

Контактные помехи

Контактной называют помеху, созданную в результате воздействия ЭМП на токопроводящий механический контакт. Как известно, на транспорте имеется большое число конструкций, которые находятся под воздействием электромагнитной энергии, излучаемой электрооборудованием, находящимся в непосредственной близости. В металлических конструкциях индуцируются ЭДС частоты распространяющегося ЭМП. Вторичное излучение этих конструкций по своим частотным свойствам не отличается от исходных излучений. Если же

на пути распространения токов наведенные встречаются неплотные контакты, имеющие диэлектрические свойства, и к тому же эти контакты меняют свое сопротивление при движении и вибрации транспортного средства, то вторичное излучение по виду спектра может существенно отличаться от исходного. Появившиеся новые составляющие спектра относят к классу контактных помех. Контактные помехи вносят заметный вклад в электромагнитную среду на таких подвижных объектах, как самолеты, поезда и т.д. Экспериментально установлено, что контактные помехи возникают на частотах ниже 30 МГц, хотя могут быть ощутимы и в диапазонах до 300 МГц. Рассмотрим принятые в настоящее время модели источников контактных помех.

Наиболее простой моделью контактного излучателя является линейная модель. Контакт представляется в виде параметрического инерционного четырехполюсника. Параметры четырехполюсника управляются некоторым случайным процессом (переключениями, тряской, вибрацией и т.д.), изменяющим амплитуду и частотно-фазовые соотношения наведенного высокочастотного тока. Очевидно, что в состоянии покоя, то есть в отсутствие управляющего процесса, контакт, описываемый данной моделью, не излучает новых частотных составляющих по сравнению с теми, которые имеются в исходном излучающем поле. Переменный контакт как бы играет роль модулятора. Ширина результирующего спектра зависит от частоты изменения контакта и преобладающего вида модуляции, что в конечном счете определяется параметрами эквивалентного четырехполюсника и частотой облучающего контакт поля [4].

Вторая модель соответствует представлению контакта в виде соединения двух четырехполюсников: линейного инерционного с переменными параметрами и нелинейного безынерционного. Модель соответствует случаю, когда контакт облучается сильным электромагнитным полем, и на контактном слое начинают проявляться нелинейные свойства. При протекании тока через нелинейность формируются гармоники и комбинации частот исходного спектра, причем их порядок определяется порядком нелинейности. Если контакт подвержен качке, вибрации и т.д., что характерно для подвижных объектов,

то каждая составляющая спектра дополнительно «расплывается». Монохроматический сигнал преобразуется на нелинейном переменном контакте в широкополосный сигнал. Его спектр состоит из ряда гармоник, число которых определяется порядком нелинейности, а ширина спектра на каждой гармонике непосредственно связана с частотой механических колебаний в месте контакта.

Третья модель может быть названа дуговой. При значительном увеличении напряженности облучающего ЭМП может разрушиться окисная пленка, что соответствует начальной стадии пробоя диэлектрического слоя между контактирующими элементами, то есть стадии дугообразования. Экспериментальные исследования показывают, что спектр излучения электрической дуги на переменном контакте представляет гауссовскую кривую, центрированную относительно частоты облучаемого рецептора.

На практике могут встретиться случаи, когда в образовании контактной помехи участвуют все три рассмотренных выше механизма переизлучения. Поэтому особую роль приобретают экспериментальные исследования данного типа помех.

Борьба с контактными помехами в месте их возникновения может осуществляться по следующим основным направлениям:

- устранение переменных контактов и причин их возникновения;
- уменьшение величин наведенного тока, протекающего через переменное контактное сопротивление, и напряжения, прикладываемого к контактному промежутку;
- экранирование источников контактных помех.

Наиболее простыми и надежными способами уменьшения числа переменных контактов между деталями и элементами корпусов подвижных объектов являются сварка и пайка. Эти способы могут быть применены, когда по конструктивным соображениям это возможно. К этому же способу можно отнести шунтирование контактов с помощью специальных перемычек, пружин, щеток. Пружины и щетки используются в тех случаях, когда имеет место взаимное перемещение контактных пар.

Дополнением к этому является введение изоляционных прокладок в местах касания. Основное требование

к изоляционным прокладкам – механическая прочность и хорошие диэлектрические свойства. Качественная изоляция на высоких частотах обеспечивается фторопластом и фарфором. Полное устранение возможности возникновения контактных помех реально при замене металлических элементов контактных пар на диэлектрические.

Если представляется техническая возможность, то для снижения вероятности контактных помех можно использовать металлические экраны на пути распространения облучающего контакт электромагнитного поля.

Защита от электромагнитных полей

Для защиты технического объекта от воздействия электромагнитных полей применяют различные средства. Выбор способа или технического средства защиты определяется многими факторами: характером ЭМП, его частотным диапазоном, амплитудно-фазовыми характеристиками, гармоническим составом и т.д. Среди основных средств защиты можно отметить два – экранирование и рациональное размещение оборудования.

Эффективное экранирование технических средств от ЭМП можно реализовать с помощью многослойных пассивных, активных и комбинированных экранов (как электрических, так и магнитных) [1, 5]. Под пассивными экранами понимают такие устройства, которые позволяют снизить величину исходного электрического, магнитного и электромагнитного полей в защищаемой области. Это снижение обеспечивается установкой экранирующего устройства на пути распространения поля. При этом экран частично отражает исходное поле, частично поглощает (или отводит по своим конструкциям, минуя защищаемую область).

В зависимости от назначения различают экраны с внутренним размещением источника ЭМП (рецепторы снаружи экрана) и экраны с внешним размещением источника ЭМП (рецепторы внутри экрана).

При расчете экранирующих функций экранов, как правило, используется общая теория ЭМП, базирующаяся на уравнениях Максвелла, которые решаются для стенки экрана и окружающих сред, а на границах решения сопрягаются с помощью граничных условий.

Наибольшая степень экранирования достигается путем применения

многослойных экранов, при этом целесообразно сочетание материалов с большой магнитной проницаемостью и большой электрической проводимостью (например, пермаллой и медь). В зависимости от интенсивности и степени неоднородности воздействующего поля может быть рассчитана оптимальная структура слоев многослойной оболочки. Многослойные экраны позволяют достичь высокого магнитного вакуума в экранируемом помещении, но отличаются высокой стоимостью.

В [6] приведены некоторые практические рекомендации использования экранов:

- начальная магнитная проницаемость и электрическая проводимость материала экрана должны быть по возможности более высокими;
- толщина экрана должна быть не меньше глубины проникновения ЭМП в конкретных условиях, а размеры экрана рекомендуется выбирать так, чтобы зазор между экраном и экранируемым элементом был не меньше половины диаметра экранируемого элемента (диаметра сферы, которой можно его описать);
- конструкция экрана должна быть выполнена таким образом, чтобы на пути силовых линий помехонесущего поля не встречались швы и стыки. Недопустимо крепление экранируемого элемента стальными деталями, которые могут образовывать пути с малым магнитным сопротивлением;
- наряду с многослойными экранами целесообразно также применение нескольких экранов, расположенных один внутри другого и разделенных воздушными промежутками.

Активное экранирование осуществляется с помощью тока, распределенного по поверхности экрана, чтобы компенсировать магнитное поле помех, проникающих в защищаемое пространство. Необходимое распределение тока по поверхности экрана может быть реализовано с помощью петлевой обмотки. Система компенсации должна быть построена так, чтобы в результате наложения магнитного поля помех и поля компенсации результирующее поле в рассматриваемой области пространства отвечало бы заданным требованиям.

Другой способ защиты технических средств от непреднамеренных помех заключается в таком размещении элементов этих средств, при котором достигается минимальное значение по-

мех в рассматриваемых точках (местах расположения рецепторов). Однако если теорию (и практику) экранирования можно считать достаточно разработанной, то вопросы рационального размещения элементов электрооборудования еще предстоит решить. Имеющиеся в литературе [6, 7] решения этой задачи весьма сложны и вряд ли могут быть рекомендованы для практического применения.

Человеческий фактор

В отличие от ранее публиковавшихся материалов по ЭМС технических средств необходимо включить в это понятие и человека, как элемент, управляющий этими средствами. Именно от человека в значительной мере зависит эффективное функционирование технического средства. Не случайно отмечают, что большинство экологических катастроф (в том числе и Чернобыльская) связаны с некомпетентным управлением персоналом техническими средствами. Поэтому полнота рассмотрения ЭМС будет достигнута, если рассматривать ЭМС технических средств и человека.

В последнее время возросло стремление к совершенствованию современных сложных электротехнических систем. С целью увеличения эффективности работы таких систем значительно усилилось внимание к надежности и безопасности как системы в целом, так и составляющих ее подсистем и отдельных элементов. Однако по мере усложнения и развития систем контрольные и управленческие показатели надежности, живучести и безопасности не только не увеличивались, но в ряде случаев и снижались. Как оказалось, в значительной мере это связано с двумя обстоятельствами: во-первых, с ухудшением качества электрической энергии, питающей систему, появлением внешних полей помех (в основном электромагнитных), во-вторых, с ошибками операторов, обслуживающих систему. Проходило время, технические задачи решались, усложнялись и совершенствовались системы, а повышения показателей их надежности не наблюдалось. Установлено, что это связано со снижением показателей надежности человека как элемента системы, что требует выявления причин влияния внешних физических полей на человека и разработки способов его защиты.

Выводы

Методы анализа электромагнитной совместимости технических средств включают в себя несколько этапов и имеют ряд особенностей:

- выявляются основные причины (электромагнитные помехи), мешающие нормальной работе рассматриваемых технических средств;

- описанными в статье методами выполняется определение напряженностей электрического и магнитного полей при постоянном токе или переменном синусоидальном (чтобы можно было использовать комплексный метод расчета амплитудных значений напряженностей и рассматривать только геометрию расположения источника и рецепторов).

Среда, в которой рассчитывается электромагнитное поле, считается линейной. Частоты, для которых справедливо отдельное рассмотрение электрической и магнитной сторон электромагнитного поля в зависимости от размеров источников и рецепторов ЭМП, составляют несколько сот килогерц. После определения распределения электрического и магнитного полей в заданном пространстве можно уточнять значения характеристик ЭМП при импульсных и синусоидальных воздействиях, например, методами, изложенными в [5].

Необходимо также учитывать особенности технического средства, влияющие на особенности расчета ЭМП: в кабине машиниста электровоза, в самолете – ограниченный объем помещения; в системах электроснабжения – протяженные кабельные сети; на железнодорожном, водном и воздушном транспорте – влияние контактных помех вследствие усиленных вибраций и тряски и др.

Для защиты технического средства от воздействия электромагнитных помех применяют экранирование и оптимальное (с позиции достижения минимальных электромагнитных помех) размещение электрооборудования. Для выбора экранов и их размещения можно воспользоваться работами Аполлонского, а вопросы рационального размещения элементов электрооборудования еще предстоит решить.

Необходимо также считаться с человеческим фактором. Для оценки влияния электромагнитных помех на человека можно воспользоваться материалами, изложенными в [1].

Литература

1. Аполлонский С.М., Горский А.Н. Расчеты электромагнитных полей: монография / Под ред. А.Н. Горского. – М.: Маршрут, 2006. – 992 с.
2. Ерофеев В.Т. Теоремы сложения. – Минск: Наука и техника. 1989. – 118 с.
3. Аполлонский С.М. Внешние электромагнитные поля электрооборудования и средства их снижения. – СПб. Безопасность, 2001. – 620 с.
4. Аполлонский С.М. Расчет электромагнитных экранирующих оболочек // Электричество. – 1988. – № 5.
5. Русин Ю.С., Гликман И.Я., Горский А.Н. Электромагнитные элементы радиоэлектронной аппаратуры: справочник. – М.: Радио и связь, 1991. – 224 с.
6. Стоян Ю.Г., Путятин В.П. Оптимизация технических систем с источниками физических полей. – Киев: Наукова думка, 1988. – 192 с.
7. Аполлонский С.М. Обеспечение ЭМС рациональным размещением источников // Судостроительная промышленность. Серия «Судовая электротехника и связь». 1990, вып. 14. С. 29–37.
8. Хожайнов А.И., Никитин В.В., Рябинин Г.А., Середа Г.Е. Экспериментальное и теоретическое исследование влияния внешнего магнитного поля на функционирование электромагнитного аппарата // Электрификация и научно-технический прогресс на железнодорожном транспорте: материалы второго международного симпозиума eltrans 2003, 21–24 октября 2003 г., ПГУПС, 2003. – С. 414–418.

Аполлонский Станислав Михайлович

Родился в 1937 году. В 1959 году окончил Высшее военно-морское инженерное орден на Ленина училище им. Ф.Э. Дзержинского (ВВМИОЛУ). Доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ. В 1988 году защитил диссертацию по теме «Комплексная задача расчета и снижения электромагнитных полей для обеспечения безопасности элементов электроэнергетики». Опыт работы – более 50 лет. В настоящее время работает научным консультантом

в ООО «Центр электромеханотроники». Имеет около 500 научных трудов, в том числе 6 авторских свидетельств, 1 патент и более 60 учебных пособий и монографий.

Горский Анатолий Николаевич

Родился в 1938 году. В 1950 году окончил Ленинградский институт инженеров железнодорожного транспорта по специальности «Инженер путей сообщений – электромеханик». Доктор технических наук, профессор. В 1995 году защитил диссертацию по теме «Методы расчета реакторно-трансформаторного оборудования преобразовательных устройств при минимизации массы и габаритов». Опыт работы – более 50 лет. В настоящее время работает профессором кафедры «Электромеханические комплексы и системы» ФГБОУ ВО ПГУПС. Имеет 111 печатных трудов, в том числе 3 учебных пособия и 4 книги.

Apollonskiy Stanislav

He was born in 1937. In 1950 he graduated from Naval Engineering college of Lenin order. He is doctorate of technical sciences, professor, honored scientist of Russian Federation. In 1988 he defended the thesis, the topic of thesis is «Electromagnetic fields complex task of calculating and reducing in order to ensure the safety of electric power elements». He has 50 years of work experience. At present he works as a scientific consultant at Eclectic mechanotronics center limited. He has 500 scientific papers, including 6 authorships, 1 patent and more than 60 study guides and monographs.

Gorskiy Anatoly

He was born in 1938. In 1950 he graduated from Leningrad Railway Engineering Transport Institute majoring in «Engineer of Railway transport – electrician». He is doctor of technical sciences, professor. In 1995 he defended the thesis, the thesis topic is «Calculating methods of reactor and transformer equipment of conversion devices during minimizing weight and dimensions». He has 50 years of work experience. At present, he works as associate professor of «Electromechanical complexes and systems department of Emperor Alexander I St. Petersburg State University of Transport». He has 111 published papers, including 3 study guide and 4 books.

Электромагнитная совместимость электроустановок и сетей нетягового электроснабжения с электрифицированными железными дорогами переменного тока

// Electromagnetic compatibility of electrical installations and networks non-tractive electricity with the electrified iron roads AC //

**Косарев А.Б., д.т. н., профессор,
АО «ВНИИЖТ», г. Москва**

**Косарев Б.И., д.т. н., профессор,
МГУПС (МИИТ), г. Москва**

В статье выполнен анализ типовых, а также перспективных решений систем тягового электроснабжения переменного тока, в том числе с позиции их электромагнитной совместимости с устройствами нетягового электроснабжения. Отмечается, что выполнение требований совместимости предполагает проведение комплексного технико-экономического анализа для каждого случая в отдельности. В форме такого анализа должны учитываться интерфейсы между различными подсистемами электрических железных дорог. Предложено для повышения эффективности работы системы тягового электроснабжения, принятия решений учитывать несинусоидальный характер тока электровоза. В частности, критерием выбора и регулирования мощности компенсирующей установки может быть принят коэффициент потребления электрической энергии. Обосновано использование для питания нетяговых потребителей воздушных линий напряжением 10 (20 и 35) кВ с шагом транспозиции, равным 7,5 км, при расположении ЛЭП на отдельно стоящих опорах и шагом транспозиции равным 3 км при расположении ЛЭП на опорах контактной сети переменного тока. При расположении ЛЭП 10 кВ на опорах контактной сети защита ЛЭП от электромагнитного влияния обеспечивается включением резистивно-емкостных фильтров.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, ток, напряжение, тяговая сеть, электроустановка, электровоз, заземление.

In the article the analysis of the model, as well as promising solutions of systems of traction power supply of alternating current, including in terms of their electromagnetic compatibility with devices of power supply non-tractive. It is noted that the implementation of compliance requirements involves conducting a comprehensive techno-economic analysis for each case separately. In the form this analysis should take into account the interfaces between the various subsystems of electric railways.

Proposed to improve the efficiency of the traction power system decision-making to take into account the non-sinusoidal nature of the electric current. In particular, the selection criteria and regulating power compensation unit can be accepted the ratio of consumption of electrical energy. Justified use to supply non-tractive consumers of overhead lines with voltage 10 (20 and 35) kV with a step of transposition is equal to 7.5 km at the location of the transmission line on separate poles and a step of transposition is equal to 3 km at the location of the power lines in support of a contact network of alternating current. When the location of power lines 10 kV for the support of a contact network protection transmission lines from electromagnetic interference is provided by the inclusion of a resistive-capacitive filters.

Keywords: electromagnetic compatibility, current, voltage, a power train, electrical device, electric, ground.

Железнодорожный транспорт играет ключевую роль в экономике страны. Вопросы использования электроэнергии и ее стоимости для железнодорожного транспорта как электрифицированных участков, так и линий с автономной тягой для стационарной энергетики приобретают важное значение. В этой связи при сохранении технической надежности и безопасности функционирования железнодорожного транспорта одной из ряда основных задач рыночной модели является проблема совершенствования энергетического комплекса железнодорожного транспорта [1, 2].

Задачи обеспечения электромагнитной совместимости электроустановок и сетей нетягового электроснабжения с электрифицированными участками переменного тока весьма актуальны, что подтверждается наличием статистических данных об отказах в работе систем управления транспортом. Повышению конкурентоспособности электрифицированного транспорта России с зарубежными разработками способствует предложенная учеными России система управления параметрами качества электрической энергии с использованием вычислительных алгоритмов и комплексов.

Выполнение требований совместимости предполагает проведение комплексного технико-экономического анализа для каждого случая в отдельности. В форме такого анализа должны учитываться интерфейсы между различными подсистемами электрических железных дорог, включающие принятие технических решений, необходимых для обеспечения бесперебойного электроснабжения ЭПС. Среди основных требований электромагнитной совместимости имеют первостепенное значение требования к системе тягового электроснабжения, которая должна:

а) обеспечивать эксплуатационные характеристики для:

- специально построенных высокоскоростных линий под скорости движения поездов свыше 200 км/ч (первая категория);
- скоростных линий, специально модернизированных под скорости от 160 км/ч до 200 км/ч (вторая категория);
- скоростных линий под скорости менее 160 км/ч (третья категория);

б) быть совместимой в местах соприкосновения токоприемника с контактным проводом и в зонах стекания тягового тока ЭПС в обратную тяговую сеть;

в) обеспечивать требования к показателям качества электрической энергии, в том числе в точке общего присоединения.

Выполненный анализ типовых, а также перспективных решений систем тягового электроснабжения переменного тока, в том числе с позиции их электромагнитной совместимости с устройствами нетягового электроснабжения, позволяет предложить следующие технические решения.

1. Для ограничения до нормируемых величин магнитного (опасного и мешающего) влияния токов электроподвижного состава на электроустановки и сети напряжением до и выше 1000 В необходимы следующие условия.

1.1. Тяговое электроснабжение высокоскоростных линий первой категории осуществляется по системе с использованием распределенного питания и провода повышенного напряжения (ППН) (рис. 1) [3, 4].

Система тягового электроснабжения работает следующим образом. При подключении разделительно-симметрирующих трехфазно-двухфазных трансформаторов 1 к трем фазам А, В, С линии электропередачи 2 с линейным напряжением $U_{лЭП}$, равным 110 или 220 кВ, на зажимах первичной обмотки первой части будет напряжение $U_{лЭП}$ и на зажимах первичной обмотки второй части будет напряжение $U_{лЭП}$. При этом трансформаторы 1 разделяют линию электропередачи 2 от тяговой сети и исключают в линии 2 протекание токов нулевой последовательности. Трансформация напряжения с коэффициентом трансформации первой части, равным единице $n_{T1} = 1$, и второй части, равным n_{T2} , обеспечивает на зажимах вторичных обмоток обеих частей напряжения, равные линейному напряжению линии электропередачи 110 или 220 кВ. Подключение вторичных обмоток первой части между контактными подвесками 3 и 4 и питающими проводами 5 и 6, второй части – между контактной подвеской 7 и питающим проводом 8 – обеспечивает питание однофазных тяговых трансформаторов 14 напряжением 110 или 220 кВ. Поскольку трехфазно-двухфазные трансформаторы 1 соединены по схеме Скотта, то напряжения первой и второй частей первичных обмоток по фазе будут взаимно перпендикулярны, а также будут взаимно перпендикулярны напряжению вторичных обмоток. Следовательно, значительно уменьшается несимметрия токов в линии электропередачи 2, а при одинаковой нагрузке плеч подстанции обеспечивается полная симметричная нагрузка линии

электропередачи 2. При подключении автотрансформаторов 14 первичными обмотками между контактной подвеской 7 и продольным питающим проводом 8 на напряжение 110 и 220 кВ, вторичными обмотками – между контактной подвеской 7 и рельсами 13 в точках питания контактной подвески 7 – обеспечивается максимально допустимое напряжение. Электровозы 15, расположенные на перегоне, получают питание от двух соседних автотрансформаторов 14, а электровозы 15, расположенные между подстанцией и первым от нее автотрансформатором 14, получают питание от этого автотрансформатора 14 и части вторичной обмотки трехфазно-двухфазного трансформатора 1, специальный вывод которого подключен к рельсам 13 с помощью отсасывающей линии 10. Поскольку между контактной подвеской 7 и питающим проводом 8 обеспечивается напряжение 110 или 220 кВ, и этим напряжением питаются автотрансформаторы 14, то уменьшается токовая нагрузка проводов подвески 7 и провода 8, уменьшаются потери напряжения и электроэнергии в тяговой сети. При этом формируются напряжения 25 кВ между контактной подвеской и рельсами и напряжение 85 или 195 кВ между продольным питающим проводом и рельсами.

Допускается тяговое электроснабжение скоростных линий первой категории осуществлять по системе 2 x 25 кВ с автотрансформаторами и питающим проводом.

1.2. Тяговое электроснабжение скоростных линий второй категории осуществляется:

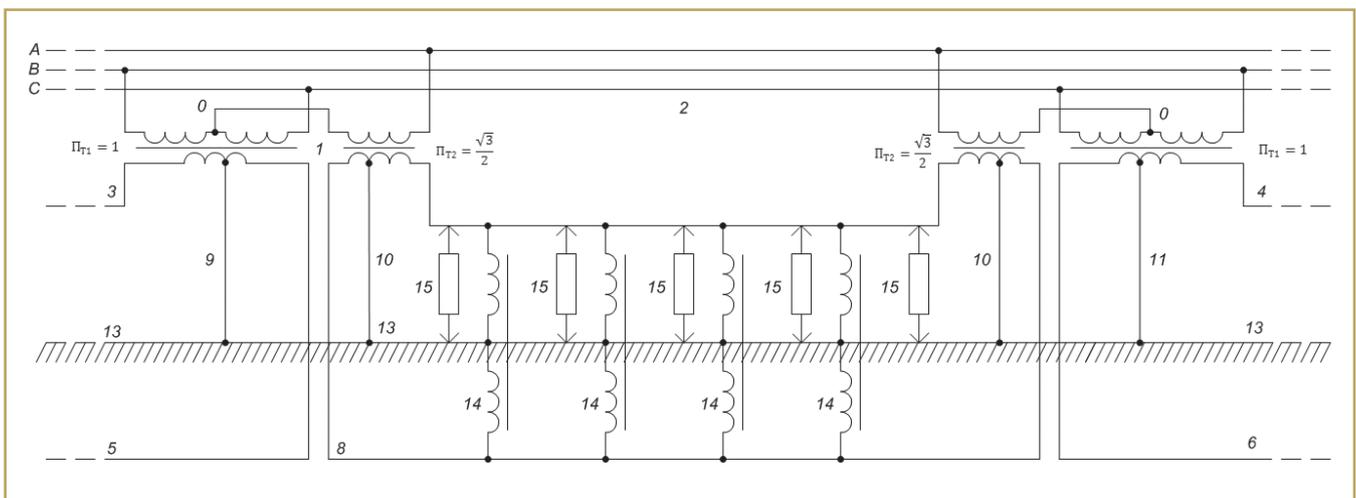


Рис. 1. Принципиальная схема системы тягового электроснабжения распределенного питания с проводом повышенного напряжения (СТЭ ППН).

- по системе тягового электроснабжения с использованием распределительного питания и провода повышенного напряжения (рис. 1). Тяговые трансформаторы, в отличие от схемы, представленной на рис. 1, подключаются первичной обмоткой между контактной сетью и продольным высоковольтным проводом, а вторичной – между контактной сетью и рельсовым путем [1];
- по системе 2 x 25 кВ с автотрансформаторами и питающим проводом, в которой тяговые трансформаторы тяговых подстанций соединены по схеме Скотта (Вудбриджа) [5];
- по системе с экранированным усиливающим проводом при соединении тяговых подстанций согласно схеме Скотта [5, 6];
- с использованием многофункциональных тяговых трансформаторов [7].

1.3. Тяговое электроснабжение скоростных линий третьей категории осуществляется:

- по схеме с экранированным усиливающим проводом и установкой на тяговых подстанциях тяговых трансформаторов с симметрирующим эффектом, собираемых по схеме Скотта;
- с использованием тяговых трансформаторов с симметрирующим эффектом [6], а также тяговых трансформаторов в сочетании с многофункциональными вольтодобавочными трансформаторами [7]. В качестве многофункционального вольтодобавочного трансформатора (МФ ВДТ) используется силовой трансформатор типа ОРМЖ-10000/27, спроектированный и изготовленный на СВПО «Трансформатор». МФ ВДТ имеет расщепленную обмотку низкого напряжения (НН).

Эта обмотка состоит из двух секций – полуобмоток с номинальным напряжением 2,5 кВ и номинальными токами 2000 А. Конструкция и изоляция обмоток всех вводов позволяют использовать указанный трансформатор не только как понижающий для установок регулируемой поперечной емкостной компенсации, но и как вольтодобавочный, но и как комбинированное средство усиления системы тягового электроснабже-

ния – вольтодобавочный трансформатор с компенсационной обмоткой (ВДТ-К). Возможен ряд схем подключения МФ ВДТ к системе тягового электроснабжения. Одна из секций обмотки НН с номинальным рабочим напряжением 2,5 кВ включается в расщепку плеча питания тяговой подстанции с наиболее низким напряжением (обычно это плечо питается от отстающей фазы тягового трансформатора) и выполняет роль ВДО – вольтодобавочной обмотки. Вторая секция обмотки НН с таким же номинальным напряжением 2,5 кВ нагружается конденсаторной батареей [8].

Мощность компенсирующей установки выбирается с учетом несинусоидального характера тока электроподвижного состава. Критерием выбора и регулирования компенсирующей установки является коэффициент потребления электрической энергии. В основу предлагаемого критерия положены результаты представления мгновенной мощности в виде мгновенных активных и реактивных мощностей.

Разложение мгновенной мощности $s = s(t)$ приемника электрической энергии на мгновенную мощность $p = p(t)$, соответствующую процессу потребления энергии, и мгновенную мощность $q = q(t)$, характеризующую обменные процессы на входе этого приемника, известно [11]. Это, в свою очередь, позволяет оценить энергетическую целесообразность работы различных электрических цепей с помощью отношения

$$Kn = \frac{W_o}{W_o + W_{\Sigma}}$$

где $W_o = \int_0^T p dt$ – энергия, потребленная участком цепи за определенный промежуток времени;

$W_{\Sigma} = \int_0^T |q| dt$ – энергия, соответствующая обменному процессу на этом участке за тот же промежуток времени.

Коэффициент Kn (коэффициент потребления электрической энергии) показывает, какая часть всей энергии на участке цепи необратимо потребляется, то есть используется полезно. Для цепей, в которых происходит только потребление электрической энергии, $Kn = 1$. Для цепей, в которых имеет место только обмен или накопление энергии, $Kn = 1$. Все остальные случаи являются промежуточными.

В отличие от известных коэффициентов, оценивающих процесс переда-

чи энергии потребления на основании анализа ее положительных и отрицательных потоков, величина Kn оценивает процесс поступления энергии от питающей системы к цепи потребления в форме активной (необратимо потребленной) и обменной (временно запасаемой) составляющих, каждая из которых является функцией входных переменных $u(t)$ и $i(t)$ приемника электрической энергии. Это обстоятельство позволяет применять критерий Kn для оценки обменных процессов в более общих случаях при любых формах кривых напряжения и тока, а также при нелинейностях в цепях потребления и, в частности, в условиях периодических напряжений и токов, содержащих постоянные составляющие.

Нетрудно также убедиться, что если в результате операции разложения функции $s(t)$ какого-либо приемника электрической энергии известна функция мгновенной непотребляемой (обменной) мощности $q(t)$, то выражение $q(t) = 0$ является общим условием, позволяющим выполнить точный расчет этого приемника, на входе которого будут отсутствовать обменные процессы [11].

2. Уменьшение числа коротких замыканий, а также снижение электромагнитного влияния системы тягового электроснабжения на электрические сети напряжением до и выше 1000 В должно достигаться:

- внедрением полимерной изоляции устройств контактной сети, постов секционирования (пунктов параллельного секционирования), линии продольного электроснабжения нетяговых потребителей и т.д.;
- уменьшением времени отключения аварийных режимов за счет применения вакуумных отключающих устройств и т.д.;
- проведением профилактических работ на контактной сети, путевых работ и т.д. лишь при снятии рабочего напряжения с контактной сети (для электрифицированных линий 1 и 2);
- использованием безынерционных токоограничивающих устройств [10];
- внедрением блочно-модульной технологии при сооружении и реконструкции тяговых подстанций, линейных устройств тягового и нетягового электроснабжений.

3. Для получения нормируемых значений показателей качества электрической энергии в точке общего присоединения должны быть внедрены:

а) на тяговых подстанциях: тяговые трансформаторы с симметрирующим эффектом, соединенные по схеме Скотта, трансформаторы с расщепленными обмотками; много-функциональные вольтодобавочные трансформаторы;

б) продольная емкостная компенсация (УПРК) и поперечная емкостная компенсация (УППК), установленные, соответственно, на постах секционирования и тяговых подстанциях.

Для повышения надежности работы систем тягового электроснабжения компенсирующие установки должны быть регулируемыми с возможностью выполнения повышенного числа коммутаций [8].

4. Обратная тяговая сеть, включающая в себя рельсовый путь с межпутными и рельсовыми соединителями, путевые дроссель-трансформаторы, рельсо-шпальную путевую решетку и дополнительные провода, подключенные параллельно рельсовому пути, должна обеспечивать надежное функционирование систем тягового электроснабжения, совместимость современных устройств управления движением поездов с системой тягового электроснабжения.

5. Обеспечение допустимых уровней электрического влияния напряжения контактной сети, магнитного

влияния токов электроподвижного состава, гальванического влияния стекающего с рельсового пути тока на низковольтные сети и электроустановки должно достигаться следующими мероприятиями.

5.1. Отказом от использования рельсового пути в качестве естественного заземлителя опор контактной сети [10, 12].

Установлено [10, 12], что существующие типы дистанционных защит позволяют определить возникновение режима короткого замыкания, обусловленного нарушением изоляции в опоре в том случае, если арматура опор контактной сети соединяется с тросом группового заземления, длина которого не превышает 400 м.

В случае невозможности соединения арматуры опор контактной сети с тросом группового заземления необходимо его подключать к двум искусственным заземлителям, сопротивление растеканию каждого из которых не превышает 15 Ом.

5.2. Отказом от грозозащиты контактной сети, питающих и усиливающих проводов.

Действительно, при разряде токов молнии в контактную сеть происходит пробой изоляции на ряде опор, поскольку грозозащитные устройства, в том числе и ОПН, расположенные на анкерных опорах, выполняют важную, но лишь частичную задачу: ограничение грозовых перенапряжений на изоляции анкерной опоры.

Кроме того, за счет электромагнитного влияния токов молнии при их разрядах в непосредственной близости от тяговых сетей уровни перенапряжения в контактной сети превышают пробивное напряжение изоляции опор. Для ограничения перенапряжений в контактной сети, имеющих место при разрядах токов молнии в землю, применение грозозащитных устройств невозможно по технико-экономическим соображениям [11].

Картина распределения мгновенных значений напряжений «Рельсы – земля» при пробое изоляции контактной сети в грозовой период приведена на рис. 2.

Показано, что при использовании в качестве заземлителя опор контактной сети экранирующего провода уровни перенапряжений в рельсовых сетях меньше аналогичных величин в случае, если рельсовый путь используется в качестве естественного заземлителя.

5.3. Заземлением грозозащитных устройств (ограничителей перенапряжения) трансформаторных подстанций, КТП на искусственный заземлитель с сопротивлением растеканию, соответствующим Правилам устройства электроустановок.

5.4. Внедрением на линиях (второй и третьей категории) экранирующих проводов для частичного выравнивания тяговых токов по рельсовым нитям [11].

5.5. Значительная часть районных потребителей электрической энергии в России получает питание от распределенных по длине электрифицированных линий продольного электроснабжения, в том числе и при их расположении на опорах контактной сети переменного тока. Поэтому весьма актуально для железнодорожного транспорта снятие барьеров по внедрению на сети собственной распределенной генерации электрической энергии как наиболее приближенной к потребителям, использующим природный газ.

Однако не всегда (и далеко не во всех регионах) возможно использование природного газа. Наличие и гарантированная стабильность получения первичного топлива в этом случае являются определяющими факторами. В качестве последнего следует рассматривать не только другие традиционные носители (уголь, мазут), но также, а в ряде случаев – и в первую очередь, альтернативные источники энергии, такие как газ подземной газификации, биотопливо, водород и др.

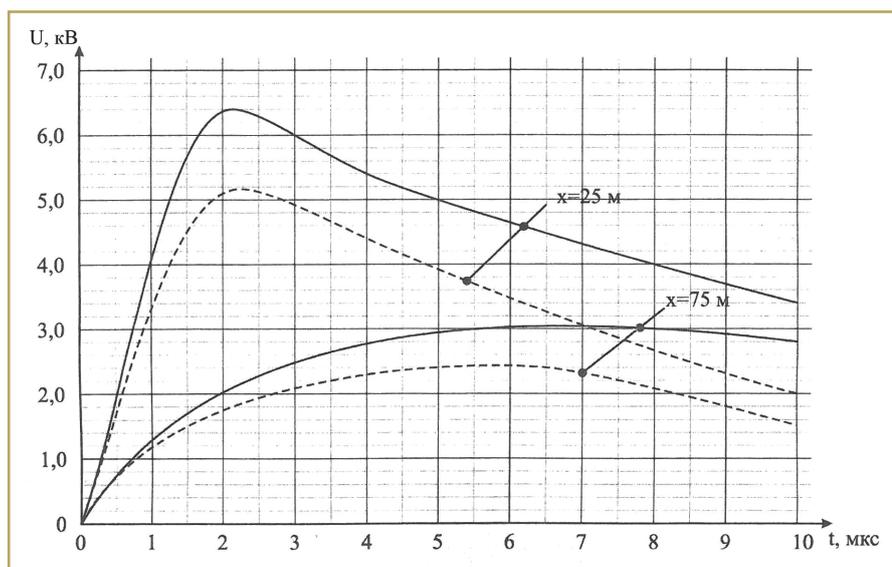


Рис. 2. Мгновенные значения напряжений «Рельсы – земля» в зависимости от расстояния до места разряда тока молнии в контактную сеть:

— при использовании в качестве заземлителя рельсового пути;
 - - - - - при использовании в качестве заземлителя экранирующего провода.

При обосновании инвестиционных проектов следует учитывать наличие линий электропередачи в зоне размещения электростанции или возможность прокладки дополнительного газопровода для транспортировки газа подземной газификации.

Существует еще целый ряд вопросов, требующих оптимального решения. В первую очередь, учитывая резкопеременный характер тяговой нагрузки, необходимо разработать адаптивные алгоритмы управления режимами работы генераторов, основанные на краткосрочных прогнозах, связанных с совместной работой потребителей и генераторов одного юридического лица, работающих в различных группах точек поставки.

Для освоения новых малонаселенных территорий с неразвитой структурой энергетики целесообразно использовать зоны отчуждения железной дороги для создания транспортно-энергетических коридоров, принадлежащих ОАО «РЖД». В их состав должны входить железнодорожные пути, автотрассы, собственные электростанции, линии продольного электроснабжения при их расположении на опорах контактной сети для питания тяговых нагрузок и линейных потребителей промышленного, транспортного и бытового назначений, оптоволоконные линии связи.

5.6. Использованием для питания нетяговых потребителей воздушных линий напряжением 10 (20 и 35) кВ с шагом транспозиции, равным 7,5 км, при расположении ЛЭП на отдельно стоящих опорах и шагом транспозиции, равным 3 км, при расположении ЛЭП на опорах контактной сети переменного тока.

При расположении ЛЭП 10 кВ на опорах контактной сети защита ЛЭП от электромагнитного влияния обеспечивается включением резистивно-емкостных фильтров [10].

При применении ЛЭП 10 кВ самонесущих изолированных проводов дистанционная защита от их обрывов выполняется по усовершенствованной схеме, в основу работы которой положен принцип фиксации напряжения нулевой последовательности, в том числе на резистивно-емкостном фильтре при его расположении в конце линии.

5.7. Осуществлением электроснабжения постов ЭЦ от трехфазных линий напряжением 10–35 кВ и использованием для исключения пожаров и электро-

травматизма при обслуживании постов ЭЦ системы TN-C-S с обязательным включением в схему автоматических выключателей [11].

6. В рамках электромагнитной совместимости электроподвижного состава с низковольтными сетями и электроустановками (рельсовые цепи, цепи управления работой устройств связи и т.п.) должна быть согласована концепция отключения токов короткого замыкания на электроподвижном составе в случае возникновения в его электроустановках и сетях аварийного режима, обеспечено прохождение без опускания токоприемника ЭПС воздушных промежутков и участков разграничения фаз (участков секционирования контактной сети).

7. Электробезопасность обслуживания электроустановок и сетей систем тягового электроснабжения должна обеспечиваться реализацией соответствующих технических решений на стадии проектирования заземляющих устройств, учитывающих геоэлектрический характер грунтов, климатические зоны и первичные критерии электробезопасности [10].

Защита персонала от поражения электрическим током (заземление) осуществляется выполнением требований Правил устройства электроустановок, ГОСТа 12.1.038–82 (переиздан в 2001 году), ведомственных правил и инструкций (в частности, ЦЭ-191 и др.).

8. Электромагнитная совместимость систем тягового электроснабжения электрифицированных железных дорог с другими системами ОАО «РЖД» не может быть обеспечена без коренного улучшения структуры управления энергетическим комплексом на основе современных информационных технологий, систем учета, мониторинга топлива и энергопотребления при ОАО «РЖД», а также созданием собственного сектора генерации электроэнергии со стабильным и гармонически изменяющимся уровнем напряжения.

Выводы

1. Предложены технические решения по обеспечению электромагнитной совместимости электроустановок и сетей нетягового электроснабжения с электрифицированными железными дорогами переменного тока.

2. Показана необходимость дифференцированного подхода к внедрению

современных систем тягового электроснабжения переменного тока для обеспечения бесперебойной работы железнодорожного транспорта на скоростных участках.

Литература

1. Косарев А.Б. Энергетическая стратегия на железнодорожном транспорте. Сборник докладов 45-го Совета по железнодорожному транспорту государств участников СНГ. – М.: 2007. – С. 136–140.
2. Косарев А.Б., Назаров О.Н. Научная поддержка высокоскоростного транспорта. – М.: Железнодорожный транспорт. – 2008. № 4. – С. 23–26.
3. Асанов Т.К., Косарев Б.И., Караев Р.И., Петухова С.Ю. Система тягового электроснабжения участков переменного тока. Авторское свидетельство SU № 1689143 А1. – М.: Патент. 07.11.91. Бюлл. № 4. – 3 с.
4. Болдырев В.Н., Власов С.П., Ключников С.В., Косарев Б.И. и др. Устройство электроснабжения электрифицированных железных дорог переменного тока. Авторское свидетельство SU № 1654056 А1. – М.: Патент. 07.06.91. Бюлл. № 21. – 3 с.
5. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрических железных дорог. М.: Транспорт. 1965. – 464 с.
6. Мамошин Р.Р., Бородулин В.М., Зельвянский А.Я., Титов А.Ф. Трансформаторы тяговых подстанций с повышенным симметрирующим эффектом. – М.: Вестник ВНИИЖТ. – № 1, – 1989 – с. 22–24.
7. Власов С.П., Косарев Б.И. Ограничение уравнивающих токов и уменьшение потерь электроэнергии в тяговых сетях с помощью ВДТ. – М.: Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2003. – № 3. – С. 37–42.
8. Герман Л.А., Серебряков А.С. Регулируемые установки ёмкостной компенсации в системах тягового электроснабжения железных дорог. – М.: РОАТ, 2012.
9. Косарев А.Б., Логинов С.В. Повышение надежности работы устройств автоблокировки за счет отказа от использования рельсовых путей для заземления опор контактной сети переменного тока. – М.: Вестник ВНИИЖТ, 2009. № 2. С. 9–12.
10. Косарев А.Б., Косарев Б.И. Основы электромагнитной безопасности систем электроснабжения железнодорожного транспорта. – М.: ИНТЕКСТ. – 2008. – 480 с.
11. Косарев А.Б., Косарев Б.И., Сербиненко Д.В. Электромагнитные процессы в системах энергоснабжения железных дорог переменного тока. – М.: ООО ВМГ-Принт. – 2015–348 с.

12. Конча А.А., Косарев А.Б. Система тягового электроснабжения с экранирующим проводом и отсоединенными от рельсов опорами контактной сети. – М.: Электричество, 1997. № 2. – С. 19–25.

Косарев Александр Борисович

Родился в 1964 году. В 1986 году окончил Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ) по специальности «Электроснабжение магистральных железных дорог». Доктор технических наук, профессор. В 1999 году защитил диссертацию по теме «Методы и средства обеспечения экологической безопасности в зонах электромагнитного влияния электрифицированных железных дорог переменного тока». В настоящее время работает заместителем генерального директора АО «ВНИИЖТ». Автор более 100 публикаций и 15 авторских свидетельств и патентов.

Косарев Борис Иванович

Родился в 1940 году. В 1962 году окончил МИИТ по специальности «Теплоэнергетические установки электростанций». Доктор технических наук, профессор. В 1979 году защитил диссертацию по теме «Электрификация железных дорог». В настоящее время работает профессором кафедры «Электроэнергетика транспорта» МГУПС (МИИТ). Автор более 300 научных трудов, имеет свыше 125 авторских свидетельств и патентов. Заслуженный деятель науки России.

Kosarev Alexander

Was born in 1964. In 1986 he graduated from Moscow State University of Railway Engineering (MIIT) with specialization in «Electrical supply of main railway lines». He is a Doctor of Engineering, professor. In 1999 he defended a thesis on the subject «Methods and means of environ-

mental security in electromagnetic interference zones of AC electrified railroads». At present he works as deputy general manager of JSC «VNIIZhT». He has more than 100 publications, 15 author's certificates and patents.

Kosarev Boris

Was born in 1940. In 1962 he graduated from Moscow State University of Railway Engineering (MIIT) with a degree in «Heat and power machines of electrical power plants». In 1979 he defended the thesis on the topic «Railways electrification». At the present time he works as a professor of «Electric power of transport» department of MSURE (MIIT). He is the author of 300 publications, more than 125 copyright certificates and patents. He is an honored academic figure of Russia.

О возмещении части затрат, связанных с уплатой пошлин при патентовании за рубежом

Постановлением Правительства от 17 июня 2016 года № 548 утверждены правила предоставления из федерального бюджета субсидий российским организациям на возмещение части затрат, связанных с уплатой пошлин при патентовании российских разработок производителей и экспортеров за рубежом.

Субсидии предоставляются в пределах бюджетных ассигнований и лимитов бюджетных обязательств, предусмотренных Министерству промышленности и торговли на соответствующий финансовый год.

Субсидии предоставляются российскому юридическому лицу, оказывающему услуги по патентованию российских разработок за рубежом в случае, если такая уплата осуществляется на основании договора об оказании услуг по патентованию разработок, предусматривающего, что пользователь не воз-

мещает оператору уплаченные патентные пошлины.

Такое российское юридическое лицо должно соответствовать следующим критериям:

- отсутствие задолженности по уплате налогов, сборов и других обязательных платежей в бюджеты бюджетной системы РФ;

- осуществление деятельности в качестве юридического лица не менее 3 лет;

- наличие в штате не менее трех российских патентных поверенных, осуществляющих деятельность в соответствии со специализацией «Изобретения и полезные модели», с непрерывным стажем работы по трудовому договору не менее 6 месяцев, для которых такое место работы является основным;

- наличие не менее 50 международных заявок за последние 3 календарных года;

- наличие не менее 100 российских заявок на выдачу патента на изобретение или полезную модель, подготовленных и поданных за последний календарный год в Роспатент.

К затратам, на возмещение которых предоставляются субсидии, относятся расходы на уплату международных пошлин, национальных пошлин, пошлин за поддержание патента в силе (не более чем за 3 первых года срока действия патента).

Отбор получателей субсидий осуществляется Министерством промышленности и торговли в соответствии с установленным им порядком.

*Краснов Л.А.
Редакция журнала
«Электроника
и электрооборудование
транспорта»*

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

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

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

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

*Краснов Л.А.
Редакция журнала
«Электроника
и электрооборудование
транспорта»*

О правилах закрепления исключительного права на результат интеллектуальной деятельности, созданный по государственному контракту до 1 января 2008 года

Постановлением Правительства Российской Федерации от 31 октября 2015 года № 1174 утверждены Правила закрепления за исполнителями работ и иными лицами исключительного права на результат интеллектуальной деятельности (РИД), созданный по государственному контракту до 1 января 2008 года и принадлежащий Российской Федерации или субъекту Российской Федерации, если государственным заказчиком не осуществлено практическое применение (внедрение) этого результата до 1 января 2015 года.

Действие Правил распространяется на РИД гражданского назначения, сведения о которых не составляют государственной тайны.

Правила определяют порядок взаимодействия между исполнителем государственного контракта, в ходе реали-

зации которого до 1 января 2008 года создан РИД, и государственным заказчиком по закреплению исключительного права на РИД, если государственным заказчиком не осуществлено практическое применение (внедрение) этого РИД до 1 января 2015 года.

Если РИД требует государственной регистрации и такая государственная регистрация не осуществлена, государственный заказчик после обращения исполнителя уведомляет его о наличии у него права принятия необходимых мер по осуществлению государственной регистрации и получению патента.

В случае если уже имеется государственная регистрация РИД либо если он не требует государственной регистрации и при этом практическое применение (внедрение) этого РИД не осуществлено до 1 января 2015 года, го-

сударственный заказчик должен заключить с исполнителем или указанным им лицом договор о безвозмездном отчуждении исключительного права на РИД.

Расходы по государственной регистрации перехода исключительного права на РИД возлагаются на исполнителя или указанное им лицо.

В договор также включается условие об обязанности исполнителя или указанного им лица и последующих правообладателей предоставить по требованию государственного заказчика указанному им лицу безвозмездную (простую) неисключительную лицензию на использование РИД для государственных нужд.

Краснов Л.А.

*Редакция журнала «Электроника
и электрооборудование
транспорта»*

Сведения об авторах

Д.т.н.

Попов Юрий Васильевич
+7-916-384-48-73

Киселев Александр Александрович
+7-921-411-53-06

Д.т.н., профессор
Ютт Владимир Евсеевич
+7-499-155-04-20

Панченко Юрий Вадимович
+7-923-240-60-65

Д.т.н., профессор
Ким Константин Константинович
+7-903-096-57-70

К.т.н.

Денисов Илья Владимирович
+7-915-776-24-14

К.т.н.

Доманов Виктор Иванович
+7-8422-41-18-63

Д.т.н., профессор
Красовский Александр Борисович
+7-916-147-23-86

Д.т.н., профессор
Аполлонский
Станислав Михайлович
+7-812-235-55-31

Д.т.н., профессор
Косарев Александр Борисович
+7-499-260-41-02

ТРЕБОВАНИЯ К РЕКЛАМНЫМ И АВТОРСКИМ МАТЕРИАЛАМ

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

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

СТОИМОСТЬ ГОДОВОЙ ПОДПИСКИ:

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

Оформить подписку можно:

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

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

e-mail: npptez@mail.ru;

– через ОАО «Агентство Роспечать» – по Каталогу изданий органов научно-технической информации 2016 г., индекс 59990.

СТОИМОСТЬ РЕКЛАМЫ:

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

4-я страница обложки – 30 000 рублей;

одна страница внутри журнала – 12 000 рублей.

Печатные материалы, используемые в журнале, являются собственностью редакции.

При перепечатке ссылка на журнал обязательна.

Полученные материалы не возвращаются.

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

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