

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:

С.С. Булгаков, д.т.н.,
Н.А. Володина, д.т.н., профессор,
В.Н. Дианов, д.т.н., профессор,
С.Г. Драгомиров, д.т.н., профессор,
Ю.М. Иньков, д.т.н., профессор,
К.Л. Ковалев, д.т.н., профессор,
Л.В. Кожитов, д.т.н., профессор,
А.В. Левин, д.т.н., профессор,
А.С. Мазнев, д.т.н., профессор,
В.А. Нестерин, д.т.н., профессор,
И.Б. Пешков, д.т.н., профессор,
В.П. Феоктистов, 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:
26.11.2013 г.

Отпечатано:

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

Формат 60х90/8,
бумага мелованная, объем 7 п.л.,
тираж 1000 экз., заказ 2177.

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ, ДИАГНОСТИКИ, СВЯЗИ

- Дебелов В.В., Иванов В.В., Козловский В.Н., Строганов В.И.**
Моделирование электронной системы регулирования скорости движения легкового автомобиля в режимах поддержания и ограничения скорости 2

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

- Набоких В.А., Нигматуллин Ш.М.**
Развитие конструкции автомобильных генераторных установок и мотор-генераторов 8
- Ютт В.Е., Оспанбеков Б.К.**
Перспективные направления развития зарядных станций для электромобилей 10
- Яковлев В.Ф.**
Электрические процессы в выпрямительных пусковых устройствах при пуске автомобильных двигателей 13
- Пупынин В.Н., Мартюкова В.А.**
Идеальный выключатель постоянного тока 17
- Логинова Е.Ю., Коваленко А.В.**
Влияние режима работы подвижного состава метрополитена на его энергетические показатели 21
- Опарина Е.В.**
Пути оптимизации подсистемы управления электрическими аппаратами электроподвижного состава 25

МЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ, ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

- Дорохина Е.С., Рапопорт О.Л., Хорошко А.А.**
Применение метода конечных разностей для определения распределения температуры в изоляции тяговых электрических машин 29
- Епифанов Г.А., Мазнев А.С.**
Компьютерное моделирование электропривода транспортного модуля с линейным асинхронным двигателем 31

ПРОБЛЕМЫ КАЧЕСТВА И НАДЕЖНОСТИ, СЕРТИФИКАЦИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ

- Зятров А.В.**
Комплексный подход к разработке перспективного показателя надёжности электрооборудования автомобиля 35

ДИАГНОСТИКА И ИСПЫТАНИЯ

- Глушченко М.Д.**
Методы определения форсированных режимов испытаний тяговых электрических машин электроподвижного состава 38
- Заруцкая Т.А., Камардин О.В., Триллер А.А.**
Создание высокоточной модели инфраструктуры крупной железнодорожной станции для диагностики и дистанционного определения места короткого замыкания 41

ИНФОРМАЦИЯ

- Перечень статей, напечатанных в журнале «Электроника и электрооборудование транспорта» в 2013 году 45

Моделирование электронной системы регулирования скорости движения легкового автомобиля в режимах поддержания и ограничения скорости

// Modeling of electronic speed control system of a car in maintenance and speed limit modes //

Дебелов В.В., Иванов В.В., д.т.н.,
Козловский В.Н., д.т.н.,
ПВГУС, г.Тольятти

Строганов В.И., к.т.н.,
МГТУ «МАДИ», г.Москва

В работе представлены результаты математического имитационного моделирования электронной системы регулирования скорости движения легкового автомобиля.

Ключевые слова: качество функционирования автомобилей, электронная система регулирования скоростного режима автомобиля, имитационное математическое моделирование.

The article describes the results of the mathematical simulation modeling of the electronic speed control system of a car.

Keywords: quality of the functioning of vehicles, electronic control of a car speed limit, simulation mathematical modeling.

Актуализация проблемы

В настоящее время перспективы развития автомобилестроения во многом определяются показателями качества и надежности функционирования автомобилей. Автопроизводители неизменно повышают технические характеристики продукции с учетом известных ограничений в области безопасности и охраны окружающей среды.

Качество функционирования автомобиля определяется рядом технических параметров, существенная часть которых обеспечивает эффективность работы двигателя внутреннего сгорания (ДВС). Потребитель в Западной Европе весьма требователен к вопросам топливной экономичности и вредным выбросам. Но при этом автомобиль не должен терять динамические характеристики и гарантировать высокий уровень комфорта.

Сегодня на отечественных автомобилях активно внедряется и совершенствуется комплекс электронной педали акселератора и электронного привода дроссельной заслонки.

Однако существует проблема, препятствующая развитию данного комплекса – недостаточный уровень программного обеспечения электронной системы управления двигателем (ЭСУД) в части реализации модуля поддержания скорости, который определяет алгоритм пропорционально-интегрального (ПИ) регулирования дроссельной заслонки.

Целью настоящей работы является разработка и реализация комплекса математических имитационных компьютерных моделей, реализующих алгоритмы рабо-

ты электронной системы регулирования скорости движения легкового автомобиля в режимах поддержания и ограничения скорости с оптимальными параметрами. При этом в качестве критериев оптимальности рассматривается топливная экономичность и обеспечение требуемых технических характеристик работы ДВС.

Общие положения о системе регулирования скорости

Метод регулирования скорости определяет механизм управления дроссельной заслонкой в режимах поддержания и ограничения скорости. Суть данного метода заключается в том, чтобы регулировать угол открытия дроссельной заслонки и тем самым изменять величину наполнения воздухом цилиндров двигателя, что позволяет менять крутящий момент двигателя и, как следствие, осуществлять регулирование скорости транспортного средства. При этом происходит имитация действий водителя при нажатии педали акселератора.

В режиме поддержания скорости система осуществляет регулирование открытия дроссельной заслонки и частоты вращения коленчатого вала для поддержания заданной скорости движения на ровном участке дороги. При езде на подъеме происходит открытие заслонки на некоторую величину для достижения заданной скорости. При движении на спуск система прикрывает дроссельную заслонку, чтобы избежать чрезмерного ускорения. Помимо этого существуют подсистемы, отвечающие за безопасность и ограничивающие пределы регулирования. При этом у во-

дителя имеется возможность осуществить обгон, а после вернуться к заданной скорости. Система также позволяет водителю произвести переключение передачи и автоматически продолжить движение с заданной скоростью.

В режиме ограничения скорости система активна, но осуществляет регулирование скорости только при достижении заданного порога ограничения. При достижении порога скорости при неполном нажатии на педаль акселератора система поддержания скорости перехватывает управление дроссельной заслонкой. При отпускании педали скорость снижается и уже не поддерживается функцией регулирования.

Структура модели системы регулирования скорости

Процесс регулирования скорости базируется на нескольких основных функциях, отвечающих за быстроту и плавность движения. В составе системы регулирования присутствуют подсистемы, которые отвечают за управление и безопасность. При структурировании модели регулирования скорости необходимо учесть обязательные компоненты, обеспечивающие полноту реализации процесса: фильтр скорости второго порядка; компоненты определения режима регулирования и управления уставкой и типом функции регулирования; компонент управления ускорением и замедлением автомобиля; компонент регулирования положения дроссельной заслонки; интегрирующее звено; компонент приостановки процесса регулирования скорости при изменении номера передачи трансмиссии; компонент расчета длительности отклонения от заданной скорости; компонент деактивации при резком изменении ускорения и реакции на ускорение.

Фильтр скорости второго порядка

Фильтр позволяет выполнить сглаживание входного сигнала скорости и тем самым осуществляет плавную регулировку выходного коэффициента, определяющего процент открытия дроссельной заслонки, за счет чего устраняются хлопки и резкие изменения положения дросселя, обеспечивается плавная регулировка скорости транспортного средства. Для регулирования скорости движения автомобиля наиболее подходящим является всепропу-

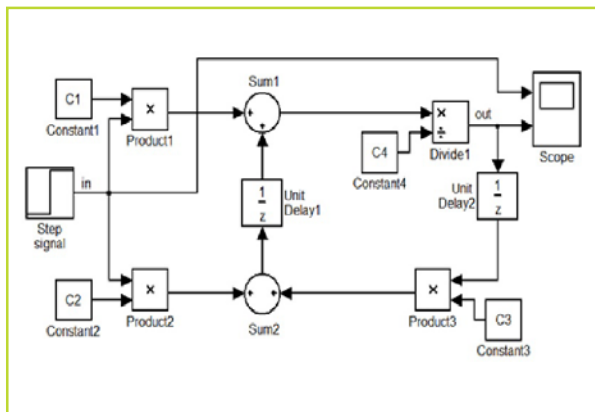


Рис. 1. Имитационная математическая модель фильтра скорости второго порядка.

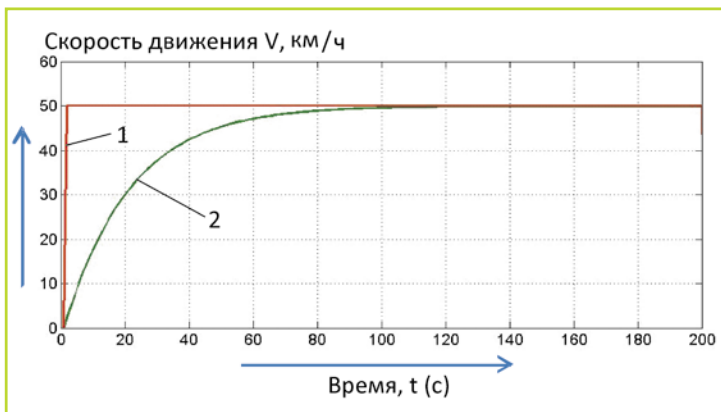


Рис. 2. График фильтрации скорости автомобиля, промоделированный в среде Matlab: 1 – входной ступенчатый импульс скорости; 2 – значение скорости на выходе фильтра.

скающий фильтр второго порядка, имитационная математическая модель которого, выполненная в среде Matlab Simulink, представлена на рис. 1.

К входу фильтра (рис. 1) подключен источник входного сигнала единичного ступенчатого импульса Step signal.

Константы C1, C2, C3 определяют работу фильтра и выбираются из соотношений

$$C4 = C1 + C2 + C3 \quad (1)$$

$$C4 = 1 \quad (2)$$

$$C1 = C2 = 1/20 \quad (3)$$

При разработке математической имитационной модели регулятора скорости использовалась бинарная система исчисления, при этом все переменные представляют собой восьми и шестнадцать битные числа. Таким образом, за единицу принимается максимальное значение восьми или шестнадцати бит, т.е. 255 или 65535.

На вход фильтра подается импульс с амплитудой равной 50 км/ч, что позволяет имитировать изменение скорости (рис. 2). В реальных условиях скорость не может измениться скачком из-за инерции транспортного средства. При изменении шага дискретизации опытным путем определяем оптимальную частоту цикла дискретизации на уровне 100 мс.

Определение режима регулирования

С учетом того, что в процессе движения автомобиля возникают условия скоростной неравномерности, изменения динамических характеристик и нагрузки, процесс регулирования скорости должен осуществляться в соответствии с текущим состоянием движения. Поэтому существует три режима работы системы регулирования скорости: режим регулирования при постоянном движении; режим регулирования во время ускорения (спуск с горы); режим регулирования во время замедления (подъем в гору).

Иллюстрацией выбора режима регулирования является график рис. 3, на котором представлены зависимости дифференциальной скорости (VSdiffraw) от ее предварительного значения.

Режим постоянного движения расположен в пределах

$$C_VSdiffneg \text{ (замедление)} < VSdiffraw < C_VSdiffpos \text{ (ускорение)} \quad (4)$$

Константы C_VSdiffneg и C_VSdiffpos определяют пределы, при которых считается, что автомобиль движется с постоянной скоростью, ускоряется или замедляется. Значения констант принимаются равными

$$C_VSdiffneg \text{ (замедление)} = -2 \text{ км/ч;}$$

$$C_VSdiffpos \text{ (ускорение)} = +2 \text{ км/ч.}$$

В постоянном режиме движения происходит регулировка угла открытия дроссельной заслонки в небольших пределах. Величина добавки при отклонении скорости и изменении числа оборотов в данном режиме небольшая. В этом режиме предполагается равномерное движение автомобиля по ровной поверхности в пределах отклонения скорости, ограничиваемом калибровочными константами.

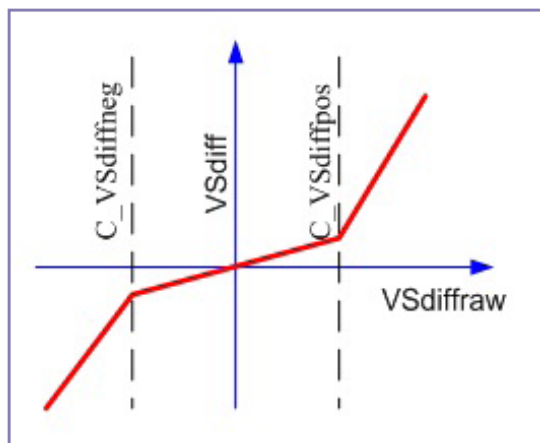


Рис. 3. Определение режима регулирования скорости.

В режиме ускорения или замедления осуществляется быстрое регулирование скорости. Величина открытия дроссельной заслонки зависит от следующих факторов: отклонение скорости от уставки; изменение оборотов двигателя; градиент ускорения; номер передачи коробки переключения передач (КПП) и ее тип.

Уставка скорости определяет величину скорости, которую необходимо поддерживать в режиме поддержания и которую следует ограничивать в режиме ограничителя. Уставка хранится в памяти микроконтроллера на протяжении работы функции.

Характеристикой режима является то, что регулирование скорости происходит быстро, но вместе с тем плавно.

При переходе от одного режима движения к другому меняются коэффициенты регулирования дроссельной заслонкой, при этом исключаются ее хлопки и дребезг, приводящие к заклиниванию или износу.

Для всех трех режимов имеется один общий параметр, называемый уставкой скорости.

Управление уставкой и типом функции регулирования

Уставка VSPconst (Vehicle setpoint const) является целевым параметром для поддержания скорости транспортного средства, а уставка VSPlimit (Vehicle setpoint limit) служит для ее ограничения. Обе уставки имеют размерность, соответствующую значению скорости автомобиля после прохождения фильтра скорости второго порядка. Значение параметра скорости движения после прохождения фильтра отстает от реальной величины скорости автомобиля (рис. 4).

Процесс выбора алгоритма регулирования (рис. 5) осуществляется в зависимости от соотношения параметров поддержания и предела скорости и реализуется через управляющий бит B_cl (constant or limitation – постоянное или ограничивающее). По умолчанию выбирается процесс поддержания заданной скорости.

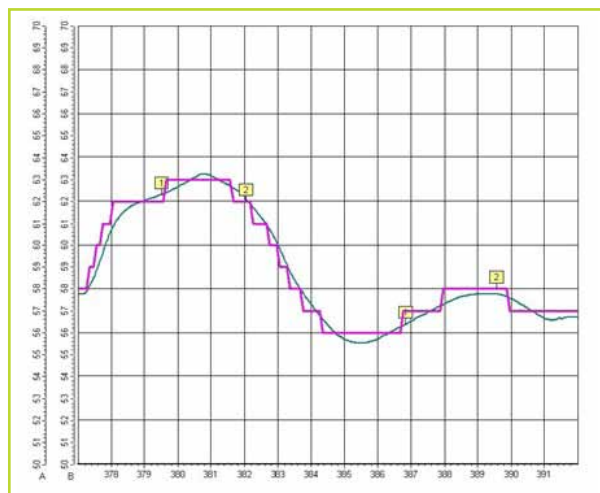


Рис. 4. Процесс фильтрации параметра скорости автомобиля, получаемой с дискретностью в 1 км/ч: фильтрованное значение скорости, км/ч (шкала А); 2 – значение скорости, получаемое от датчика скорости, км/ч (шкала В).

Данному случаю соответствует нижнее положение переключателя Switch (рис. 5). При выбранном, но неактивном процессе поддержания скорости величины QCout (Quantify Control out – контролируемое значение выходного сигнала) равняется нулю, а величина положения педали, зависящая от водителя, передается в основную модель управления электронной педалью в качестве выходной величины QCpedalN (Quantify Control of pedal demand – виртуальная модель, определяющая алгоритм взаимодействия электронной педали и механизма открывания дроссельной заслонки), которая впоследствии определяет угол открытия дроссельной заслонки.

В случае, если функция ограничения скорости выбрана и активна, то переключатель Switch (рис. 5) находится в верхнем положении и регулировка дроссельной заслонки осуществляется, исходя из условий минимума. При достижении заданной скорости автомобиля будет осуществляться перехват управления процессом регулирования скорости, и происходит стабилизация по заданному пределу скорости (рис. 6).

Запись уставки скорости и активация функции в режиме поддержания скорости

Для режима поддержания скорости запись уставки и активация производится копированием текущего значения скорости в ячейку памяти, в которой она впоследствии хранится на протяжении времени работы процесса. При этом обязательно производится инициализация компонента интегратора начальными значениями, соответствующими текущему углу открытия дроссельной заслонки. В момент активации разрешается работа базовой функции ПИ регулирования положения дроссельной заслонки в переменную QCpedalN (рис. 5)

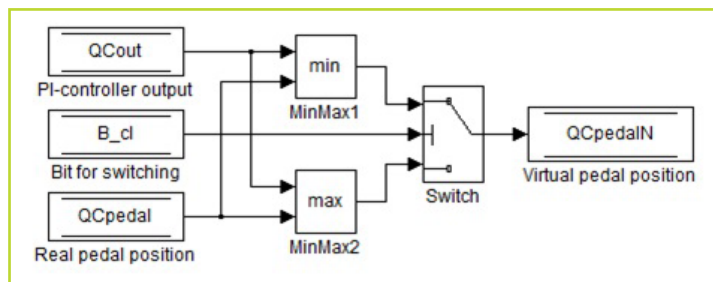


Рис. 5. Имитационная математическая модель выбора типа функции регулирования.

попадает значение, соответствующее текущей величине нажатия на педаль акселератора.

Запись уставки скорости и активация функции в режиме ограничения скорости

Для режима ограничения скорости нет необходимости производить инициализацию интегратора, поскольку активация может производиться как на неподвижном, так и на движущемся автомобиле. Инициализация интегратора может привести к ложному открытию дроссельной заслонки, что приведет к броску оборотов двигателя. При этом производится копирование уставки скорости из памяти постоянного запоминающего устройства (ПЗУ) в переменную VSPlimit и последующая активация функции путем включения разрешающего бита базовой функции поддержания скорости.

Прибавление и убавление уставки

При добавлении уставки производится добавление числового значения одновременно к двум переменным. Первая отвечает за текущее значение уставки, а вторая хранится для режима восстановления скорости из памяти микроконтроллера. Переменные имеют одинаковую размерность. В текущий момент времени они определяются как целевые VSPlimit и VSPconst, а те, что хранятся в памяти для режима восстановления заданного значения скорости, называются референсные VSPlimit0 и VSPconst0 (через ПЗУ или флеш карту).

Для обеспечения плавной регулировки скорости на момент добавления уставки

необходимо осуществлять фильтрацию значения уставки скорости фильтром второго порядка для случаев, когда величина добавки составляет более чем 3 км/ч. В противном случае резкая добавка приведет к резкому ускорению и некомфортным ощущениям водителя.

Процесс пошагового добавления уставки осуществляется прибавлением числа к текущему целевому значению, а затем копированием этого значения в референсную переменную. При этом максимальное и минимальное возможное значение уставки ограничивается калибровочными константами и должны быть целыми положительными числами.

Убавка уставки осуществляется отниманием калибруемой константы от переменных VSPlimit и VSPconst и одновременным копированием значений в референсные переменные VSPlimit0 и VSPconst0.

На рис. 7 показан процесс добавления уставки скорости на движущемся автомобиле в режиме поддержания скорости. При увеличении или уменьшении уставки на некоторую величину функция регулирования меняет положение дроссельной заслонки, что приводит к изменению количества воздуха в цилиндрах и в последующем увеличению или уменьшению оборотов двигателя и, как следствие, скорости автомобиля.

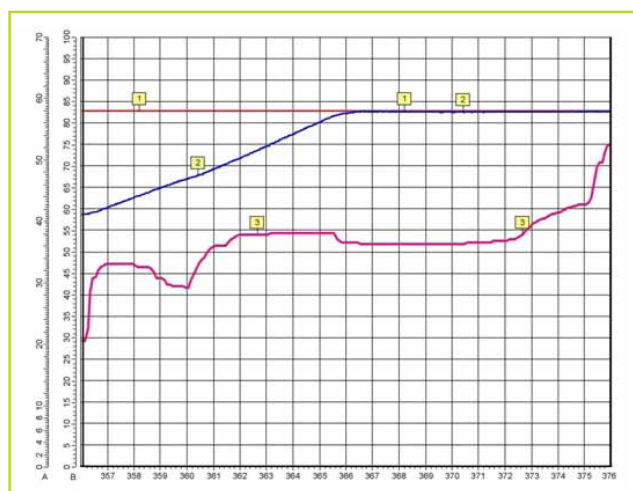


Рис. 6. Регулирование скорости в режиме ограничения: 1 – уставка VSPlimit скорости, км/ч (шкала А); 2 – кривая реальной скорости автомобиля, км/ч (шкала А); 3 – величина нажатия на электронную педаль акселератора, % (шкала В).

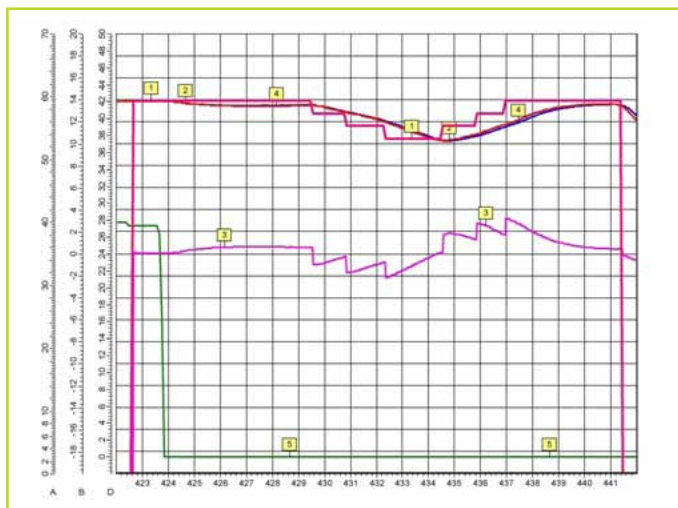


Рис. 7. Режим поддержания скорости. Изменение уставки скорости автомобиля:

1 – величина уставки для режима поддержания скорости, км/ч (шкала A); 2 – кривая реальной скорости автомобиля, км/ч (шкала C); 3 – дифференциальная скорость автомобиля, км/ч (величина рассогласования скорости, шкала B); 4 – фильтрованная скорость, км/ч (шкала D); 5 – процент нажатия на педаль, % (шкала D).

Управление ускорением и замедлением автомобиля

В случае необходимости увеличения или уменьшения скорости автомобиля относительно действующей уставки используют функцию ускорения и замедления. Процесс изменения скорости может достигаться различными способами. Первый способ – путем воздействия на уставку. Второй – путем изменения угла открытия дроссельной заслонки. Отличие данных методов заключается в том, что при непосредственном воздействии на дроссельную заслонку скорость автомобиля изменяется в зависимости от желания водителя. Данный метод применяется, но его использование сопряжено с рядом проблем, в числе которых безопасность работы процесса регулирования скорости и вероятность выхода из строя механизма управления дроссельной заслонкой. В свою очередь реализация метода увеличения скорости за счет воздействия на уставку занимает больше времени, но при этом является безопасной, так как не требует введение новых связей, отвечающих за базовые функции безопасности системы управления двигателем. Повышение скорости за счет повышения уставки может достигаться различными способами.

Здесь возможно линейное и нелинейное изменение уставки.

На рис. 8 показан процесс ускорения и замедления автомобиля путем воздействия на уставку скорости.

Интегрирующее звено

При регулировании скорости движения транспортного средства в составе функции поддержания и ограничения скорости присутствует интегратор. Интегратор является общим компонентом для трех режимов регулирования: постоянного, при ускорении и при замедлении. Имитационная математическая модель интегратора представлена на рис. 9.

На вход интегратора попадает величина рассогласования скорости VSdiff и табличный коэффициент FacIntegr (корректирующий коэффициент интегратора), зависящий от числа оборотов двигателя. После перемножения данных коэффициентов производится проверка условия разрешения работы интегратора EnIntegr (Enable of Integrator – разрешение сигнала работы интегратора, запуск основного алгоритма поддержания работы дроссельной заслонки). Если условие выполняется, то в интегратор попадает значение перемноженных коэффициентов, но если это

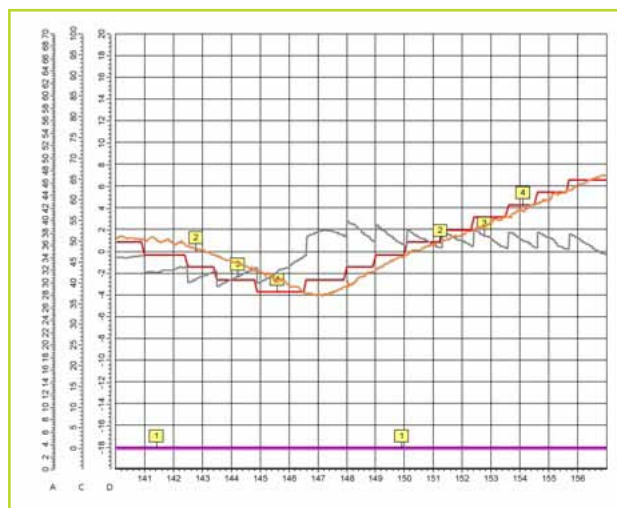


Рис. 8. Ускорение и замедление автомобиля за счет изменения уставки скорости:

1 – процент нажатия на педаль, % (шкала C); 2 – текущая скорость автомобиля, км/ч (шкала C); 3 – дифференциальная скорость, км/ч (шкала D); 4 – уставка для поддержания скорости, км/ч (шкала A).

условие не выполняется, то в нем находится величина инициализации ResV (Reset Value – уровень сигнала инициализации интегратора). Данный прием необходим для того, чтобы на момент активации функции в ней уже было значение, соответствующее реальному положению дроссельной заслонки. На следующем этапе происходит ограничение выходной величины интегратора максимальным MaxIntegr (максимальная граница интегрирования) и минимальным MinIntegr (минимальная граница интегрирования) пределом. Значение с выхода интегратора суммируется с пропорциональной составляющей и в результате получается величина QCount, определяющая величину регулирующего воздействия на виртуальную педаль.

Базовый компонент регулирования положения дроссельной заслонки

Предварительно в составе базовой функции регулирования необходимо рассчитать величину рассогласования уставки выбранной скорости и величины параметра скорости после прохождения фильтра второго порядка (рис. 10). Величина рассогласования определяется разницей между фильтрованной скоростью и устав-

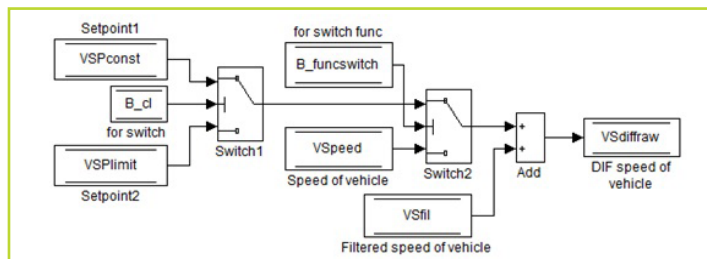


Рис. 9. Интегрирующий компонент.

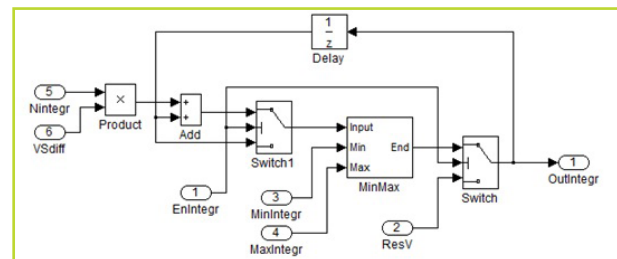


Рис. 10. Расчет рассогласования скорости и уставки.

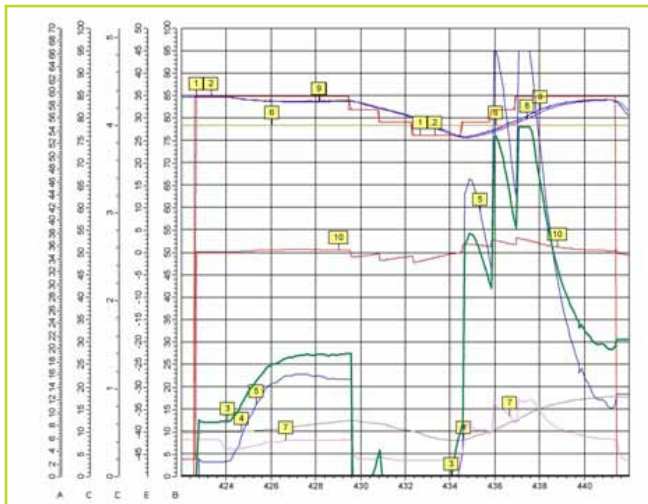


Рис. 11. Регулирование в режиме поддержания скорости:

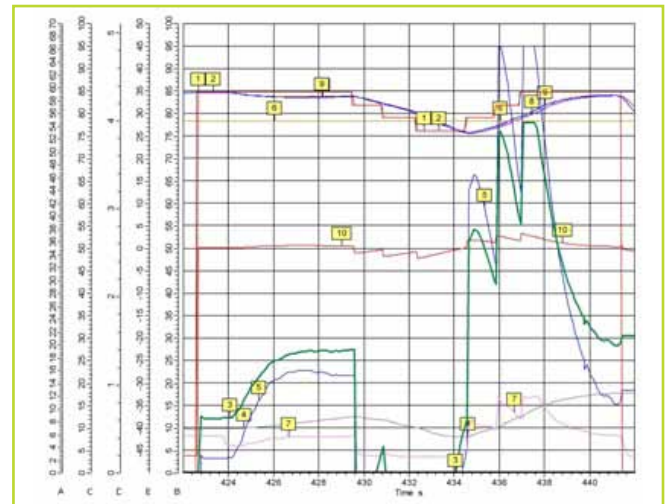


Рис. 12. Регулирование в режиме ограничения скорости.

кой. Данное значение рассогласования является не точным, предварительным и в последующем будет скорректировано при помощи регулировочных констант.

После определения рассогласования скорости и уставки происходит определение процесса регулирования. В соответствии с этим выбирается одна или несколько элементов модели (рис. 10). При переходе в подмодель происходит пересчет $VS_{diffraw}$ и приведение ее к формату VS_{diff} . При этом константы $C_{VS_{diff_fac}}$ и $C_{VS_{diff}}$ позволяют осуществить оптимальные калибровки величины отклонения.

Для трех режимов пересчет VS_{diff} заключается в следующем:

- 1 режим постоянного движения:

$$VS_{diff} = VS_{diffraw} \times C_{VS_{diff_fac}} \quad (5)$$

- 2 режим ускорения:

$$VS_{diff} = VS_{diffraw} \times C_{VS_{diff_fac}} + C_{VS_{diff}} \quad (6)$$

- 3 режим замедления:

$$VS_{diff} = VS_{diffraw} \times C_{VS_{diff_fac}} - C_{VS_{diff}} \quad (7)$$

В составе базового компонента ПИ регулирования имеется функция инициализации интегратора, которая позволяет принимать начальное значение в соответствии с типом коробки переключения передач (механическая, автоматическая, или роботизированная). Тип КПП определяется переменной $Typegear$.

Таким образом, определяющими факторами в инициализации интегратора являются: тип КПП, текущий номер передачи (отношение оборотов к скорости) и частота оборотов ДВС. После инициализации компонент выполняет основные действия по регулированию скорости (рис. 11, 12).

На рис. 11, 12 и 13 номера характеристик и определяющих их шкал соответствуют, поэтому приведем необходимое описание один раз:

1 – уставка для поддержания скорости, км/ч (шкала А); 2 – референсная уставка поддержания скорости, км/ч (шка-

ла D); 3 – величина результирующего регулирующего воздействия, % (имитация нажатия на педаль акселератора, шкала С); 4 – значение на выходе интегральной составляющей регулирующего воздействия (шкала С); 5 – значение на выходе пропорциональной части регулирующего воздействия (шкала D); 6 – номер передачи (dec, шкала D); 7 – величина открытия дроссельной заслонки, % (шкала В); 8 – фильтрованная скорость, км/ч (шкала С); 9 – реальная скорость, км/ч (шкала В); 10 – величина рассогласования уставки и скорости, км/ч (шкала Е).

Процесс регулирования скорости в режиме ограничения скорости показан на рис. 12.

Функция приостановки регулирования скорости на момент изменения номера передачи трансмиссии

При изменении переключения передачи необходима временная деактивация функции с последующим возобновлением. Данная необходимость возникает из-за

уставки из памяти переменной $VSPconst$ или $VSPlimit$, но остается храниться в переменной $VSPlimit0$ и $VSPconst0$; запускается таймер для определения длительности переключения передачи. Если значение таймера достигло калибруемой константы $C_timGear$ (время переключения передачи КПП), то функция деактивируется. После отпущения педали сцепления производится запуск другого таймера, который считает в сторону уменьшения от калибруемого значения $C_timClutch$ (время синхронизации работы системы сцепления и ДВС), после которого производится сравнение номера передачи и принятие решения о деактивации функции или не деактивации. В момент, когда педаль сцепления отпущена, производится возврат уставки из памяти переменных $VSPlimit0$ и $VSPconst0$ в память переменных $VSPlimit$ и $VSPconst$.

Таким образом, данная реализация алгоритма переключения позволяет исключить ложных деактиваций функции и дает возможность правильно определить номер передачи при движении на подъем или на спуск.

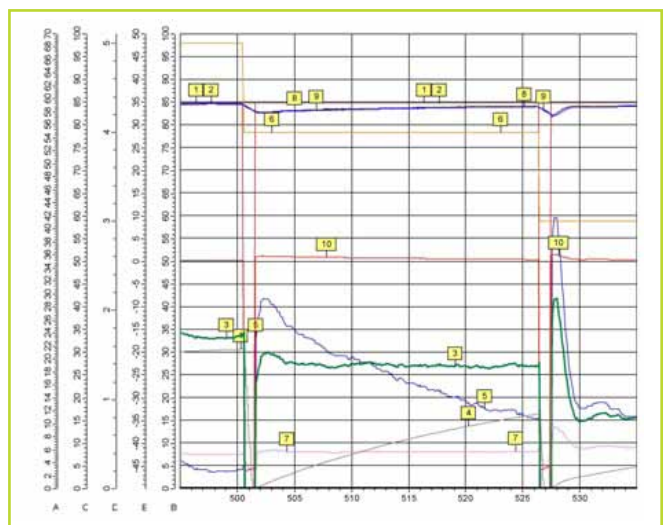


Рис. 13. Процесс регулирования скорости в режиме переключения передач КПП.

Переключение передачи и поведение дроссельной заслонки в режиме поддержания скорости представлено на рис. 13.

Компонент расчета длительности отклонения от заданной скорости

Компонент необходим для безопасного регулирования скорости транспортного средства. Предполагается, что при крутом подъеме, когда функция неспособна поддерживать заданную скорость или наоборот при быстром спуске, необходимо передать управление дросселем водителю и при этом произвести деактивацию компонента.

Вторым назначением функции является помощь водителю в достижении заданной скорости движения в зависимости от длительности отклонения от уставки. Предполагается, что при большом отклонении от уставки недопустимо резкое увеличение скорости, а необходимо постепенно возвращаться к заданной скорости путем плавного приоткрытия дросселя на необходимую величину и в последующем возвращать его в оптимальное положение для дальнейшего поддержания заданной скорости.

Третье назначение – это функция безопасности. Если ускорение или замедление с отклонением от уставки по длительности превышает заданную константу, тогда производится деактивация функции поддержания или ограничения скорости.

Ограничение и деактивация процесса регулирования

Ограничение и деактивация процесса регулирования скорости необходимы при условиях, когда процесс работает в недопустимых режимах. При этом необходимо обеспечить его немедленную деактивацию. Различают два типа компонентов деактивации и ограничений: ограничение процесса поддержания скорости и отключение компонента ограничителя скорости.

Таким образом, использование современных средств математического имитационного моделирования обеспечивает возможности проведения комплекса работ, связанных с проектированием

и теоретическим анализом параметров функционирования сложных электронных систем автомобиля, к числу которых относится и система регулирования скорости движения.

Разработанные модели представляют собой универсальный комплекс, позволяющий разрабатывать компоненты других электронных систем автомобиля: системы автоматической парковки и адаптивной системы поддержания скоростного режима.

Дальнейшая работа по совершенствованию разработанного комплекса должна проводиться в рамках решения задачи адаптации полученных теоретических моделей к реальному процессу движения автомобиля.

Дебелов Владимир Валентинович – в 2012 году окончил Тольяттинский государственный университет по специальности «Промышленная электроника». Лауреат научной конференции молодых специалистов ОАО «АВТОВАЗ». В настоящее время работает инженером Дирекции технического развития ОАО «АВТОВАЗ» и является аспирантом Поволжского государственного университета сервиса. Автор 5 научных работ.

Иванов Виктор Васильевич – окончил Куйбышевский электротехнический институт связи. Доктор технических наук, в 2006 году защитил докторскую диссертацию на тему: «Генераторные преобразователи повышенной чувствительности для систем управления и контроля». В настоящее время работает деканом факультета информационного и технического сервиса «Поволжского государственного университета сервиса», профессор кафедры «Информационный и электронный сервис». Автор более 100 научных работ.

Козловский Владимир Николаевич – инженер по специальности «Электрооборудование автомобилей и тракторов», в 1999 году окончил Тольяттинский политехнический институт. Доктор технических наук. В 2010 году защитил докторскую диссертацию на тему: «Обеспечение качества и надежности системы электрооборудования автомобилей». Автор более 80 научных работ, в том числе двух монографий. В настоящее время работает про-

фессором в Поволжском государственном университете сервиса.

Строганов Владимир Иванович – родился в 1958 году. Кандидат технических наук. В 2006 году защитил кандидатскую диссертацию на тему: «Комбинированная энергоустановка городского автобуса с буферным источником мощности». В настоящее время работает проректором по капитальному строительству МГТУ «МАДИ». Автор более 30 научных работ.

Debelov Vladimir – in 2012 has graduated from Tolyattinskiy state university with a specialization in «Industrial electronics». He is an award winner of the scientific and technical conference of young professionals of JSCo «AUTOVAZ». At present he works as engineer of technical development top management in JSCo «AUTOVAZ». He is also a postgraduate student at Povolzhskiy state service university, an author of 5 scientific works.

Ivanov Victor – has graduated from Kuibyshevskiy electronic technical communication institute. He is a Doctor of Engineering Science, in 2006 he defended a doctorate thesis on «Hypersensitive generator transducers for control and monitor systems». At present he works as dean of the information and technical service faculty at «Povolzhskiy state service university», a professor of the department «Information and E-services», an author of more than 100 scientific works.

Kozlovskiy Vladimir – is an engineer, specialization is «Car and tractor electric equipment», in 1999 he graduated from Tolyatty Polytechnic Institute. Doctor of Engineering. In 2010 he defended a Dphil, the theme is: «Quality and safety assurance of car electric equipment system». The author of more than 80 scientific works, including two monographs. At present he is a professor in Povolzhye State Service University.

Stroganov Vladimir – was born in 1958. He is a candidate of technical sciences. In 2006 he defended a Ph.D. thesis, the theme is: «Combined electricity generating plant of a city bus with a buffer power source». At present he works as a pro-rector of capital construction in MGTU «MADI». He is an author of more than 30 scientific studies.

Развитие конструкции автомобильных генераторных установок и мотор-генераторов

// Development design automotive generator and motor-generator //

**Набоких В.А., к.т.н. профессор,
Нигматуллин Ш.М., к.т.н. профессор,
Московский Государственный Технический
Машиностроительный Университет (ММИ), г. Москва**

В статье рассмотрены основные тенденции развития конструкции автомобильных генераторов и мотор-генераторов, намечены направления по разработке математических моделей и методов инженерных расчетов при их проектировании.
Ключевые слова: генератор, мотор-генератор, шаговый электродвигатель, постоянные магниты, компактные конструкции, синергический привод.

In article describe principal development design automobile generator and motor-generator/ Describe general method mathematical model calculation//
Keywords: generator, starter-generator, steps-motor, permanent magnet, package unit, syneresis motor drive.

В условиях интенсивного движения автомобилей в городских условиях дорожного движения, характеризующегося частыми остановками и работой на частичных нагрузках и холостом ходу, 70% энергии топлива тратится на увеличение кинетической энергии и только 30% – на преодоление внешних сопротивлений движению автотранспортных средств (АМТС). В связи с этим основными стимулами разработки автомобильных генераторных установок и мотор-генераторов являются:

- проблемы снижения расходов топлива в городском цикле движения;
- уменьшение выбросов токсичных веществ отработавших газов ДВС.

Безусловно, ведущую роль в решении задач снижения расходов топлива и выброса вредных веществ сыграла электронизация автомобилей и развитие технологий и конструкций электронных и электротехнических изделий, например, микропроцессорной техники, емкостных накопителей электрической энергии (молекулярных накопителей).

Особенностями принципов конструкции и алгоритма работы энергетических установок являются:

- наличие двух источников энергии: тепловой – ДВС и электрической – АКБ и накопителя энергии [1];

- совместная работа теплового двигателя и электрической машины;
- синхронизация вращательного движения коленчатого вала ДВС и ротора электрической машины с помощью планетарного редуктора;

- оптимизация рабочего процесса теплового двигателя и электрического привода;
- распознавание режимов работы транспортной машины и выбор наиболее благоприятного его протекания с минимизацией потерь;
- обеспечение безопасности для водителя и обслуживающего персонала при проведении технического обслуживания и диагностики.

Эти принципы обусловили конструктивные и технологические особенности автомобильных генераторов и мотор-генераторов, в том числе и комбинированной энергетической установки.

В генераторных установках намечается увеличение удельных показателей до значений 350-430 Вт/кг, благодаря применению новых магнитных материалов и ленточного статора, которые позволят увеличить количество витков фазной обмотки при сохранении габаритов компактной конструкции.

Примером может служить мощный ряд нового поколения генераторов фирмы «Bosch» (ФРГ).

При использовании жидкостного охлаждения меняется область применения бесщеточных генераторов. Их используют на автомобилях для аномально жарких условий или же в автомобилях высшего класса для снижения акустического шума.

Расширяется область применения однокристалльных регуляторов напряжения на базе микроконтроллера, которые могут обладать регулируемыми и диагностическими функциями, связанными, в том числе, по мультиплексной сети автомобиля. Помимо функции регулирования напряжения генератора в таком регуляторе имеется возможность оценивать степень заряженности АКБ, отличать режим пуска, холостого хода и нагрузки, регулировать нагрузку генератора по электрическим сигналам и обмениваться информацией о напряжении генератора с микропроцессорной системой управления ДВС.

Система электропривода

В области электропривода прогнозируется применение электродвигателей с плоским якорем и возбуждением от постоянных магнитов высокой энергии с интегрированными в них электронными преобразователями. В области линейных перемещений рабочих органов найдут применение линейные шаговые двигатели, интегрированные в единый модуль с импульсным блоком управления, команды на который будут передаваться по единой мультиплексной сети автомобиля.

Наиболее интенсивно развиваются гибридные силовые установки (комбинированные энергетические установки), которые представляют собой комбинацию теплового двигателя (двигателя внутреннего сгорания, турбины, свободно-поршневого генератора газа) и электрического генератора, который обеспечивает энергией электропривод колес автомобиля. Применение на двигателях внутреннего сгорания стартер-генераторов и переход на бортовое напряжение 42В позволяет использовать молекулярные накопители электрической энергии на нестационарных (переходных) режимах работы автомобиля (разгон, торможение и пр.) в качестве дополнительного источника электрической энергии для мотор-генератора, который выполняет функции силового агрегата [2].

Таблица 1. Перспективный мощный ряд генераторных установок.

Показатель	Компактные конструкции	Для грузовиков среднего класса	Для тяжелых грузовиков
Мощность кВт	1,9; 2,1; 2,4	2,3; 2,5; 3,0	3,1; 3,8
Вес кг	6,6	7,0...7,1	8,6

Применение такой гибридной схемы силовой установки автомобиля позволяет уменьшить мощность ДВС на 30-40% (вместо восьмцилиндрового применяют шестицилиндровый двигатель), улучшить экологические и экономические показатели автомобиля.

Управление такой гибридной силовой установкой осуществляется с помощью микро-ЭВМ, которая обеспечивает оптимизацию рабочих режимов (стартерный, генераторный режимы, заряд молекулярного накопителя, режимы работы электропривода).

В некоторых комбинированных энергетических установках реализуется сложная кинематическая передача от ДВС к генератору и электроприводу, что позволяет использовать ДВС либо в качестве привода колес автомобиля, либо в качестве привода электрогенератора. Это позволяет осуществлять пуск ДВС, трогание автомобиля, рекуперацию энергии при торможении и улучшить динамику разгона.

Синхронный мотор-генератор

Синхронный мотор-генератор позволяет использовать его как в качестве привода колес автомобиля, так и электрического генератора. Он представляет собой статор с обмотками, питаемыми от импульсного преобразователя, и ротор с постоянными магнитами, который вращается со скоростью вращения магнитного поля статора (рис. 1).

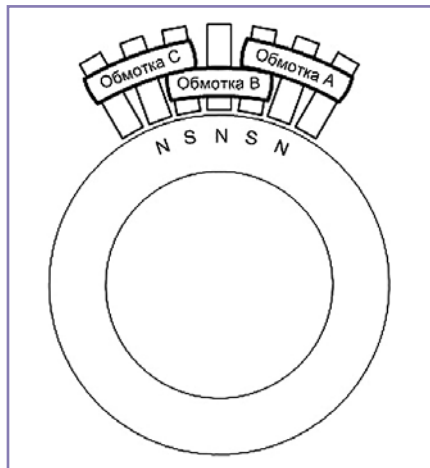


Рис. 1. Структура синхронного мотор-генератора.

Система управления мотор-генератором пропускает через катушки статора такие токи, чтобы на статоре образовывался многополюсный магнитный поток, притягивающий ближайшие полюса ротора (как известно, разноименные полюса притягиваются). Для вращения ротора катушки обмоток статора А, В и С последовательно переключаются таким образом, чтобы магнитные полюса статора опережали полюса ротора и ротор следовал за полем.

Аналогичные маломощные двигатели называются шаговыми, если питание обмоток статора производится от электронно-

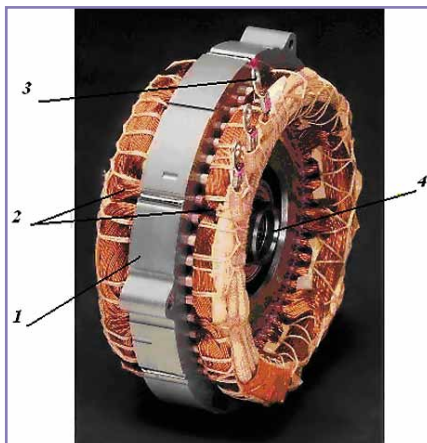


Рис. 2. Конструкция мотор-генератора МГ1:

1 – статор; 2 – фазные секционные обмотки; 3 – выводы обмоток; 4 – посадочное место ротора МГ2.

го коммутатора с изменением полярности напряжения. Они широко применяются в точной механике. Ротор шагового двигателя представляет собой особым образом намагниченное кольцо, полюса которого перескакивают от одной катушки статора к другой при изменении полярности – ротор перемещается как бы шагами. Для управления шаговым двигателем не требуется синусоидальная форма питающего напряжения, даже из названия видно, что на катушки статора просто подается полное напряжение.

Реальная конструкция мотор-генераторов (рис. 2) соответствует шаговому электродвигателю, в котором обмотки полюсов для плавности вращения электромагнитного поля несколько перекрывают друг друга.

Применение ротора с постоянными магнитами решило множество проблем, присущих обычному синхронному двигателю. Прежде всего – отсутствие контактных щеток обмотки возбуждения ротора и простота его конструкции.

Такой двигатель имеет важное свойство – обратимость. Чтобы превратить его в генератор, достаточно привести его ротор во вращение внешней силой и на его обмотках появится напряжение. Мощные полевые транзисторы IGBT управляемого моста должны быть закрыты. Обратные диоды, которые стоят «антипараллельно» каждому IGBT-транзистору, будут работать как простой трехфазный мост и формировать постоянное напряжение в высоковольтной цепи. Статоры обоих моторов-генераторов в КЭУ имеют по девять полюсов, а роторы – всего шесть.

Перечисленные новшества в электрические машины для автомобиля потребовали создания новых методов расчета магнитных полей в воздушном зазоре генератора в среде «ANSYS» и создания математической модели магнитного поля в воздушном зазоре и алгоритмов инженерных расчетов конструктивных параметров генератора [3].

Литература:

1. Борейша Е.Д., Нигматуллин Ш.М. Li-Po аккумуляторные батареи. Материалы 77-й международной научно-технической конференции ААИ «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров», Москва, МГМУ (МАМИ), 27-28 марта 2012 г., стр. 1-7.
2. Набоких В.А., Нигматуллин Ш.М., Чижков Ю.П., Тышлаков М.А. Классификация систем автотракторного электрооборудования. Труды III Международной научно-практической конференции «Автомобиль и техносфера», Казань, КГТУ им. Туполева, 17-20 июня 2003 г., стр. 705-714.
3. Нигматуллин Ш.М., Шендеровский И.М., Любимый О.И. Особенности применения метода граничных элементов для расчета магнитных полей автомобильных генераторов с когтеобразным ротором. Материалы 77-й международной научно-технической конференции ААИ «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров», Москва, МГМУ (МАМИ), 27-28 марта 2012 г. стр. 60-71.

Набоких Владимир Андреевич – родился в 1947 году. В 1961 году окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана. Кандидат технических наук, защитил диссертацию на тему: «Зажигание в двигателях внутреннего сгорания». Имеет 52-летний опыт работы. В настоящее время работает профессором на кафедре АТЭ МГТУ «МАМИ». Имеет 56 печатных трудов, 18 авторских свидетельств, 17 учебно-методических материалов, в том числе 9 учебников. Награжден 3 медалями, 2 отраслевыми наградами, медалью и дипломом ВДНХ.

Нигматуллин Шавкат Мухамедович – родился в 1947 году. В 1970 году окончил Казанский авиационный институт по специальности «Электрооборудование летательных аппаратов». Кандидат технических наук, доцент. В настоящее время работает профессором кафедры «Автотракторное электрооборудование» МГТУ «МАМИ».

Nabokih Vladimir – was born in 1947. In 1961 he graduated from MVTU named after N.E. Bauman. He is a Candidate of Engineering, defended a thesis, the theme is: «Ignition in internal-combustion engines». He has 49 year work experience. At present is working as a professor in ATE department of MGUT «MAMI». He is the author of 56 printed works, 18 author's certificates, 17 teaching-methodological materials, including 9 textbooks. He is awarded with 3 medals, 2 trade awards, the medal and the diploma of VDNH.

Nigmatullin Shavkat – was born in 1947. In 1970 he graduated from Kazanskiy aviation Institute specializing in «Electric equipment of aircrafts». He is a candidate of Engineering, docent. At present he works as professor at the department «CAR-AND-TRACTOR electrical equipment» in MGUT «MAMI».

Перспективные направления развития зарядных станций для электромобилей

// Perspective development directions
of charging stations for electric vehicles //

**Ют В.Е., д.т.н., профессор,
Оспанбеков Б.К.,
МАДИ (ГТУ), г. Москва**

В статье рассмотрены существующие разработки зарядных станций для электромобилей и перспективы развития инфраструктуры для зарядки электромобилей в России и за рубежом. Проанализирована мировая статистика стран с наиболее развитой инфраструктурой. Ключевые слова: электромобиль, инфраструктура, станция, зарядное устройство, сеть, электроэнергия.

The article deals with the development of the existing charging stations for electric vehicles and prospects for the development of infrastructure for charging electric vehicles in Russia and abroad. Analyze the global statistics of countries with the most developed infrastructure. Keywords: electric vehicles, infrastructure, station, charger, net, electric power.

Последние изменения на рынке электромобилей показывают создание мощного импульса для роста спроса и предложения на данные транспортные средства. Для электромобилей, как и для классических автомобилей, необходима дозаправка. Индустрия сервиса неизбежно будет развивать зарядную инфраструктуру, необходимую для потребителей. Стоимость зарядки электромобиля будет определяться на основе стоимости производства и доставки электроэнергии, а это, в свою очередь, потребует двух новых участников в цепочке создания стоимости: владельца инфраструктуры и оператора зарядной станции. Вместе эти игроки будут формировать цепочку создания стоимости, которая будет иметь универсальную структуру, что позволит потребителям быстро выбирать способы зарядки на их усмотрение, то есть выбрать режим зарядки, производителя энергии, оператора зарядной станции и т.д. Правила, которые регулируют эту отрасль, во многом продиктованы техническими, экономическими и законодательными условиями. В докладе фирмы ABB предлагается 4 правила, которые влияют на позиционирование компаний на рынке зарядки электромобилей: необходимо заряжаться примерно каждые 150 км; зарядка может осуществляться практически в любом месте и кем угодно; стоимость зарядки должна снизиться до 3 евро за полную зарядку; чем быстрее зарядка, тем больше стоимость [1]. Этот набор правил позволяет расширить спектр внедрения новых бизнес-моделей, что приведет к появлению новых операторов за пределами придорожных сервисных станций. Ожидается появление коммерческих зарядных станций на территории ре-

сторон, на парковках торговых и бизнес-центров, а также значительное увеличение станций на территории центра города. Создание цепочек определения стоимости зарядки будет способствовать развитию IT-технологий и создавать выгоду для всех заинтересованных сторон. Это будет важнейшим аспектом в выживании и конкуренции новых фирм в индустрии зарядки электромобилей. На сегодняшний день сделаны большие шаги в развитии зарядной инфраструктуры для электромобилей.

Уровень развития инфраструктуры для зарядки электромобилей в России

ОАО «ФСК ЕС» планирует создать на территории России зарядную инфраструктуру для электрического транспорта. Целью развития зарядной инфраструктуры является широкомасштабное внедрение электротранспорта. Сеть зарядных станций для личного и общественного транспорта позволит создать базу для массового применения электромобилей, в том числе и для производственных целей. Кроме того, реализация программы создаст дополнительный импульс для отечественного автомобилестроения. Развертывание инфраструктуры в городах Российской Федерации с населением более полу-миллиона человек, будет осуществляться с учетом географических и климатических особенностей. Предполагается, что отечественный автопроизводитель также будет активно участвовать в реализации программы, координируя свои планы по выпуску электромобилей и автомобилей с комбинированными энергоустановками (КЭУ). На сегодняшний день уже реализован проект «МОЭСК-EV», заказчиком которой явля-

лась ОАО «Московская объединенная электросетевая компания». Проект был закончен в декабре 2012 года. В результате реализации проекта было установлено 28 зарядных станций, работающих в режиме 3 (зарядка переменным током) и режиме 4 (быстрая зарядка постоянным током высокой мощности); разработан и введен в эксплуатацию программный комплекс по технологическому управлению сетью зарядных станций; поставлены легковые электромобили Mitsubishi i-MiEV, Nisan Leaf, Chevrolet Volt, пассажирские и грузопассажирские электробусы Smith Electric Edison [2]. Разработаны проекты стандартов и требований к техническим регламентам для функционирования электротранспорта. Подготовлено 13 проектов законодательных поправок, необходимых для внедрения и развития электротранспорта и зарядной инфраструктуры в РФ. Разработаны два новых типа зарядных станций с расширенным функционалом в части технологического управления, поддерживающих режим 1 и режим 3. Была сформирована бизнес-модель участия ОАО «МОЭСК» в создании зарядной инфраструктуры для электротранспорта на территории г. Москвы и Московской области в трех вариантах [2]. Кроме того, топливная компания «ЕКА» установила комплекс экспресс – зарядки для электромобилей на территории автозаправочного комплекса. На территории АЗС компании «ЕКА» введен в работу комплекс экспресс – зарядки, работающий в двух режимах Mode 3 (мощность до 43 кВт) и Mode 4 (CHAdeMO, мощность до 50 кВт), что позволит зарядить любой электромобиль в соответствии с международными стандартами для зарядных станций.

Существующая инфраструктура в мире

Недавно был открыт первый крупный участок шоссе на западном побережье США, специально адаптированный для электромобилей. Владельцы современных и экологически чистых транспортных средств могут использовать удобные зарядные станции в штате Орегон. Предполагается, что шоссе для электромобилей пройдет параллельно трассе Interstate 5 от границы с Канадой до границы с Мексикой. Вдоль первого участка шоссе находятся восемь зарядных станций, расположенных

примерно в 25 милях друг от друга. На каждой станции находятся два пункта для зарядки аккумуляторов электромобиля, в том числе одно быстрое зарядное устройство на постоянном токе. Также планируется возведение более 40 дополнительных зарядных станций «AeroVironment». Эти объекты введены в эксплуатацию в штатах Орегон и Вашингтон. После введения в эксплуатацию шоссе West Coast Electric Highway станет реальным путешествие по всей территории США для владельцев электрических транспортных средств. Правительство США официально объявило о том, что частная компания «AeroVironment» установит сеть быстро-зарядных станций – парковок, которые будут способны перезаряжать аккумуляторы электромобилей всего за 30-40 минут [3]. Инфраструктура станций для зарядки электромобилей, в которую компанией инвестировано около 132 млн. долл., будет построена на шоссе 15 вдоль всего западного побережья США, начинаясь в Канаде и заканчиваясь в штате Орегон [4]. Сеть будет включать в себя 2500 парковочных точек в Сиэтле и 15 тыс. станций в штатах Орегон, Вашингтон, Аризона, Теннесси и Калифорния. Большинство из этих станций будет оснащено зарядным устройством типа level 2, которое в течение часа подпитывает аккумулятор для поездки на расстояние 48-60 км. Некоторые станции будут оснащены зарядным устройством типа level 3, которое за полчаса обеспечит заряд аккумулятора для 70-ти километровый поездки. Данная фирма производит целую линейку зарядных станций. Одной из наиболее технологичных моделей является «EVSE-RS+», которая является умной зарядной станцией. Она способна общаться с сетью, позволяя потребителю контролировать время и способ зарядки, что обеспечивает минимизацию расходов на коммунальные услуги. Кроме этого, станция производит зарядку, когда нагрузка на сеть минимальна. При достижении максимальной нагрузки на сеть, зарядная станция приостанавливает зарядку. Кроме этой станции фирмой выпускаются станции для быстрой зарядки, модели EV50-PS, EV125-PS, EV250-PS соответственно имеют мощность 50, 125, 250 кВт. Данные станции позволяют водителю зарядить станцию в течение нескольких минут. С развитием аккумуляторных батарей стало возможным поддержание быстрой зарядки, что позволяет зарядить батарею электромобиля мощностью 25 кВт до 80% за 10 минут, в зависимости от температурных условий. Все три станции подключаются к промышленной сети [5].

Автопромышленность Германии сделала большой шаг вперед на пути популяризации электромобилей у себя в стране. Для того, чтобы все будущие владельцы электромобилей получили доступ к общенациональной инфраструктуре удобных и надежных зарядных станций, «BMW Group», «Bosch», «Daimler», «EnBW»,

RWE и «Siemens» создали совместное предприятие. Руководители компаний считают, что его цель заключается в разработке и вводе в эксплуатацию инфраструктурной платформы, которая позволит создать интегрированную инфраструктуру зарядных станций для увеличения мобильности автолюбителей и облегчения работы поставщиков электромобилей. Учредители нового предприятия умышленно сделали свою платформу открытой. Это направлено на вовлечение как можно большего количества партнеров. Рынок электромобилей в Германии развивается быстрыми темпами, поэтому возникает необходимость в легкодоступной, интегрированной инфраструктуре зарядных станций. А для того, чтобы клиенты могли легко и просто получить доступ к этой инфраструктуре, где бы они ни были, различные технологии на рынке электромобилей должны быть объединены между собой.

Английская компания Ecotricity открыла сеть зарядных станций на объектах придорожного сервиса, которые позволят беспрепятственно путешествовать на электромобиле между крупными городами Великобритании. Зарядное устройство компании Ecotricity для электромобилей использует энергию ветра и солнца. Устройство было представлено в Green Park в рамках первой национальной сети зарядных устройств. Зарядная станция способна одновременно заряжать два электромобиля. Установка оснащена панелями солнечных батарей, которые будут дублировать работу ветровых турбин при полном штиле. Зарядная станция поддерживает все типы зарядных разъемов электромобилей, существующих сегодня на рынке. Для полной зарядки обычных электромобилей может понадобиться около двух часов, однако «быстрозарядные» автомобили следующего поколения будут готовы к поездке всего через 20 минут. Первоначально «Электрическое шоссе» объединит Лондон, Бристоль, Манчестер, Эксетер, Бирмингем, Ливерпуль, а также национальный заповедник Лейк-Дистрикт. «Ecotricity» планирует оборудовать электрическими заправками и станции электрического обслуживания на трассе M-1 недалеко от Ноттингема, Шеффилда и Лидса. Каждая точка будет включать в себя два типа устройств: с 3-контактным разъемом на 13А (время зарядки 7-8 часов) и более мощное на 32А (время полной зарядки 3-4 часа). Зарядные устройства, оснащенные ветровыми турбинами и солнечными панелями, компания «Ecotricity» планирует установить на заправочных станциях в сети «Welcome Break» по всей стране. После того как строительство зарядной инфраструктуры будет полностью завершено, водители на экологически чистых электромобилях смогут добраться от Лондона до Эдинбурга. Основная доля электроэнергии, продаваемая компанией «Ecotricity», вырабатана на собственных солнечных и ветряных электростанциях.

Самой большой проблемой для владельцев электромобилей было и остается обеспечение своевременной зарядки аккумулятора. В настоящее время большинство из них заряжают свои автомобили в домашних условиях, поэтому не рискуют далеко отъезжать от своего жилища. Но если автолюбители будут знать, что на трассе есть возможность подзарядить батарею, то смогут отправиться и в более дальнюю поездку [6].

Ряд компаний начал заниматься разработкой инновационных технологий для подзарядки электромобилей в беспроводном режиме. Совсем недавно компания «Daimler» успешно протестировала систему индуктивной подзарядки электромобилей. Такие автомобили, как Mercedes E-Cell и Nissan Leaf, будут работать с подобными системами, где не требуется никаких проводов, чтобы зарядить аккумуляторную батарею. «Nissan» также разрабатывает систему быстрой подзарядки. Такие системы подзарядки можно установить в собственном гараже, на частных и некоторых общественных парковках. Британская компания «HalolPT» готовится к коммерческому запуску беспроводных зарядных станций для электромобилей. Технология индукционной зарядки появится в Европе и Азии в течение следующих полутора лет. Строительством производственных мощностей для систем «HalolPT» займется европейский поставщик зарядных устройств компания «Chargemaster». Новый завод будет выпускать все необходимое оборудование. В проекте также примет участие производитель литиево-ионных батарей компания «Evida Power», которая в течение следующих 5 лет соберет 40 тысяч HalolPT-станций для азиатского рынка. Системы индукционной зарядки будут предлагаться в качестве опции для будущих электромобилей. «HalolPT» совместно с инженерной фирмой Agur уже продемонстрировала свой электромобиль в Лондоне [7]. В днище автомобиля установлен приемник в форме пластины и машина заряжается, просто заехав на парковку, пластина – передатчик может быть скрыта под дорогой. Эта система избавляет от необходимости постоянного подключения электромобиля с помощью проводов. Беспроводная зарядка способна сделать революцию самого принципа зарядки. Вместо того, чтобы подключать свой автомобиль каждую ночь с помощью проводов, владельцы могут просто припарковать свой автомобиль на своей зарядной площадке и забыть о нем, так как он будет заряжаться автоматически. Основным препятствием на пути осуществления проекта является стоимость. «HalolPT» считает Англию лучшим местом, в котором можно продать свои системы беспроводной зарядки, но установка зарядных станций в дорожное полотно будет стоить гражданам Англии около 97 млрд. долларов. Модернизация одного существующего электромобиля беспроводной технологией составит около 5 тыс. долларов.



Рис. 1. Функциональная схема Charge Grid: 1- солнечная батарея; 2 – электромобиль; 3 – двунаправленный инвертор; 4 – станция быстрой зарядки; 5 – дополнительная аккумуляторная батарея.

«HalolPT» надеется убедить производителей электромобилей на установку беспроводной зарядки в новых электромобилях, в результате чего система беспроводной зарядки станет более экономически эффективной для потребителей [8].

Интеллектуальная инфраструктура для электромобилей Electric Vehicle Intelligent Infra Structure (ELVIIS) – совместный исследовательский проект компаний «Volvo», «Ericsson», «Geteborg Energy» и «Viktoria Institute», разработавших комплексное решение для зарядки аккумуляторов для электромобилей, которое включает в себя удобный интерфейс для управления параметрами зарядки. Благодаря применению ELVIIS появится возможность заряжать аккумуляторы от любой доступной розетки (на стоянке, у магазина, рядом с местом работы, в гостях и т.д.). Положение места зарядки определяется по спутниковой навигации в машине. С помощью сенсорного экрана в электромобиле (либо дистанционно – через смартфон или планшет) владелец автомобиля задает желаемое время зарядки и запрашиваемое количество энергии (добавляемый километраж). Используя сотовую сеть, автомобиль связывается с компьютерами энергетической компании, чтобы согласовать тариф и сообщить количество энергии. Фактическое время начала зарядки может сдвигаться компьютером в зависимости от смены тарифа (день/ночь, утро/ вечер), если это возможно. Если несколько электромобилей, адаптированных под работу с ELVIIS, одновременно будут подключаться к сети, приоритет в зарядке будет отдан тем, кому нужно быстро получить «аварийную» порцию километража и отправиться дальше в путь. Следует отметить, что счет за данную заправку компьютеры энергетической

сети просто приписывают к домашнему счету за электричество владельца независимо от места зарядки. В качестве платформы инженеры выбрали электромобиль Volvo C30 Electric. Компания Toshiba планирует создать инфраструктуру Charge Grid, которая будет использовать дополнительные аккумуляторные батареи для полезного расходования избытка электроэнергии, который будет генерироваться солнечной батареей. В этой системе литий-ионные аккумуляторы будут подключены к электросети через двунаправленный инвертор. Charge Grid обеспечивает быструю зарядку электромобилей, используя излишки электроэнергии от солнечных батарей, установленных в жилых домах или коммерческих зданиях.

Ночью, когда электроэнергия от сети малодоступна или в то время, когда энергия солнечных батарей недоступна, зарядная сеть будет опираться на дополнительные батареи, установленные в здании. Преимущества системы Toshiba являются устранение необходимости в строительстве электрической подстанции и соответствующего оборудования. В данном ключе параллельное использование солнечных батарей и литий-ионных батарей выглядит очень эффективным.

Таким образом, можно выделить основные области применения, как электромобилей, так и инфраструктуры в целом. На сегодняшний день такими областями является общественный транспорт, постройка станций вдоль автомагистралей, совместно с обычными заправочными станциями для бензиновых и дизельных автомобилей, у жилых домов и торговых центров. Позиции основных мировых автомобильных брендов позволяют сделать вывод о том, что инфраструктура для электромобилей развивается полным ходом и является перспективным направлением. В целом электромобиль – единственный вариант применения на легковом автотранспорте дешевой (по сравнению с бензином) энергии, вырабатываемой АЭС и электростанциями других типов. Массовое применение электромобилей смогло бы помочь в решении проблемы «энергетического пика» за счет подзарядки аккумуляторов в ночное время.

Литература:

1. Towards Winning Business Models for the EV-Charging Industry – Abb Систем. требования: Adobe Reader. URL: [http://www05.abb.com/global/scot/scot344.nsf/veritydisplay/472865366f28bfc9c1257990003fdba2/\\$file/4](http://www05.abb.com/global/scot/scot344.nsf/veritydisplay/472865366f28bfc9c1257990003fdba2/$file/4)

evc200801-aren_towardswinningbusinessmodels.pdf (дата обращения: 02.03.13).

2. Проект «ЕКА АЗС», проект «МОЭСК-EV» // Компания Революта:[сайт] [2012]. URL: <http://revoluta.ru/proekty>.

3. Открытие первой секции Американского шоссе для электромобилей // Автомобильный транспорт. – 2012. №9. – С. 67.

4. West coast green highway [Электронный ресурс] URL:<http://www.westcoastgreenhighway.com/electrichighways.htm>

5. Electric Vehicle Charging Products [Электронный ресурс] URL: <http://evsolutions.avinc.com/uploads/products>

6. Электрическое шоссе между крупными городами Великобритании // Автомобильный транспорт. – 2012. №5. – С. 66.

7. Tali Aaron. Wireless Charging May Soon be Available for Electric Cars 2012. URL: <http://buildaroo.com>

8. Коммерческое производство беспроводных зарядных станций // Автомобильный транспорт. – 2012. №6. – С. 58.

Ют 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 института (ГТУ). Имеет более 200 научных трудов, патентов. Заслуженный деятель науки и техники РФ, Почетный работник высшей школы, награжден двумя медалями.

Оспанбеков Бауржан Кенесович – родился в 1990 году. В 2012 году окончил Костанайский Государственный Университет имени А. Байтурсынова по специальности «Транспорт, транспортная техника и технологии». В настоящее время является магистрантом кафедры «Электротехника и электрооборудование» МАДИ (ГТУ).

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 Road-transport Institute (State Technical University). 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.

Ospanbekov Baurzhan – was born in 1990. In he has graduated from Achmet Baitursynov Kostanay State University with a specialization in «Transport, transport equipment and technologies». At present he is undergraduate student «Electrical engineering and electric equipments» in Moscow Road-transport Institute (State Technical University).

Электрические процессы в выпрямительных пусковых устройствах при пуске автомобильных двигателей

// Electric processes in mains powered jump starters during cranking //

Яковлев В.Ф., к.т.н.,
Самарский государственный
технический университет, г. Самара

Исследована зависимость токов в пусковых устройствах, стартере и аккумуляторной батарее автомобиля в зависимости от её температуры и степени разряженности при пуске двигателя. Рассмотрен режим заторможенного стартера. **Ключевые слова:** автомобильная свинцово-кислотная аккумуляторная батарея, пуск двигателя, пусковое устройство, выпрямитель.

The paper analyses dependence of currents in mains powered jump starter, starter and automotive battery during cranking of battery temperature and state of charge. Stalled mode of starting system is considered. **Keywords:** automotive lead-acid batteries, cranking, jump starter, rectifier.

Выпрямительные пусковые устройства

Выпрямительные (трансформаторные) пусковые устройства – это мощные однофазные или трехфазные выпрямители, подключаемые через трансформатор к однофазной сети переменного тока 50 Гц 220 В или трехфазной 380/220 В. Они используются в качестве источника дополнительной электроэнергии для облегчения запуска автомобильного двигателя в холодную погоду.

Использовать мощный сетевой источник электропитания только для нечастого пуска автомобильных двигателей зимой нерационально, поэтому изгото-

вители предлагают потребителю комбинированные устройства с полезными для гаража функциями: пуско-зарядные устройства, пуско-зарядно-сварочные устройства, пуско-зарядно-питающие устройства и т.д.

На рис. 1 приведена схема возможного варианта реализации однофазного выпрямительного пускового устройства.

На рис. 2 представлена схема замещения цепи «трансформаторное пусковое устройство – бортовая автомобильная АКБ со стартером». Здесь: E_{60} – ЭДС батареи; R_{60} – внутреннее сопротивление АКБ; $R_K = 0.001$ Ом – сопротивление замкнутых контактов реле серии 897 [1].

В двухполупериодном выпрямителе со средней точкой полуобмотки трансформатора с диодами работают поочередно, каждая по полпериода, поэтому выпрямитель представлен на схеме замещения только одним плечом. На схеме замещения (рис. 2) мощный выпрямительный диод моделируется последовательно включенными элементами: идеальным диодом VD, динамическим сопротивлением R_d и источником ЭДС

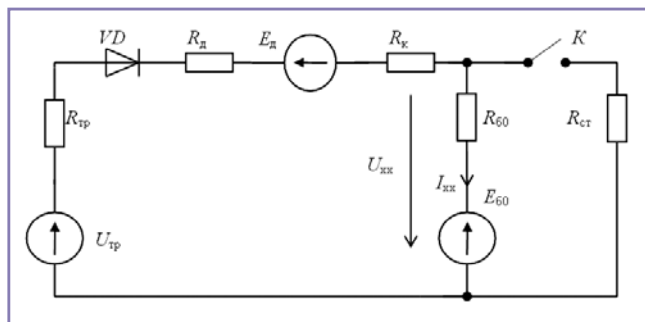


Рис. 2. Схема подключения выпрямителя к АКБ.

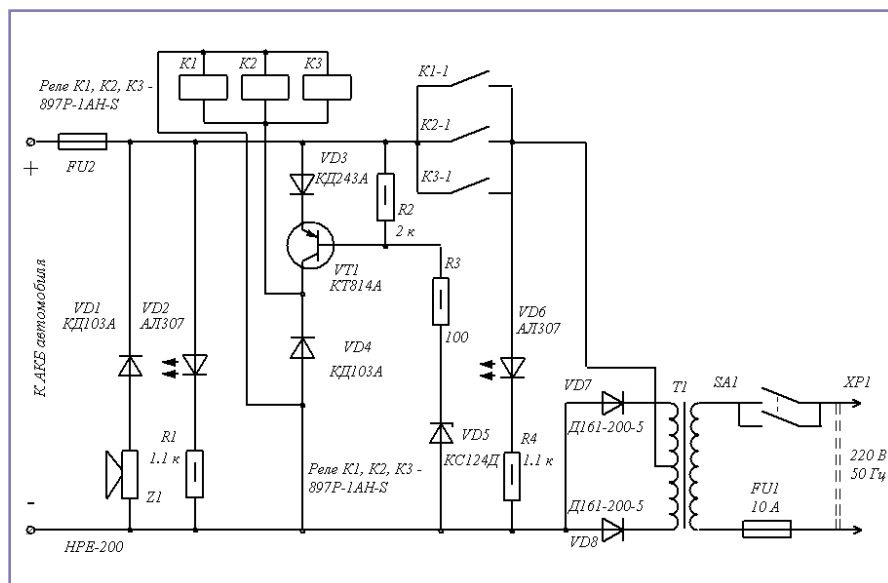


Рис. 1. Выпрямительное пусковое устройство.

E_d , соответствующим пороговому напряжению диода.

В выпрямительных однофазных пусковых устройствах применяются диоды со средним выпрямленным током $250 \div 400$ А [2]. В этом случае $E_d = 0.8 \div 0.9$ В, $R_d = 0.0005 \div 0.0006$ Ом [3].

Просадка напряжения под нагрузкой в трансформаторе моделируется с помощью сопротивления $R_{тр}$ в схеме замещения. Величину $R_{тр}$ оценим по мощности трансформатора и току нагрузки с учетом повторно-кратковременного режима работы пускового устройства [4]. У однофазных пусковых устройств для легковых автомобилей с током $200 - 300$ А $R_{тр} \approx 0.004 - 0.007$ Ом.

На рис. 3 приведены графики напряжения и тока АКБ, когда пусковое устройство подключено, а прокрутка еще не производится.

ЭДС аккумуляторной батареи E_{60} направлена встречно выходному напряже-

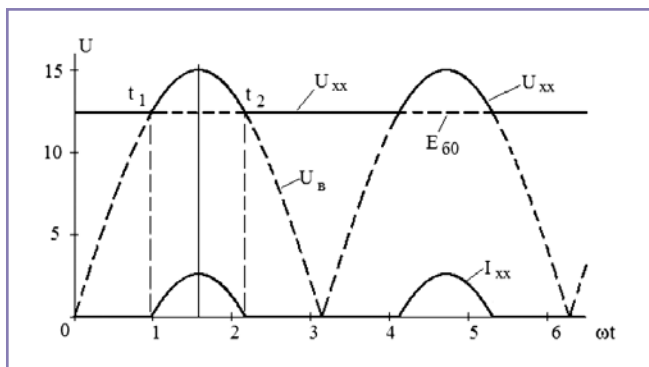


Рис. 3. Графики напряжения и тока АКБ.

нию выпрямителя U_B , т.е. выпрямитель работает на нагрузку с противо-ЭДС. Ток I_{xx} проходит через диоды VD7, VD8 только когда $U_B > E_{60}$, для одного из полупериодов интервал проводимости обозначен как $t_1 \div t_2$

$$t_1 = \arcsin \frac{E_{60} + E_d}{\sqrt{2} \cdot U_{TP}}, \quad t_2 = \pi - t_1 \quad (1)$$

Здесь U_{TP} — действующее значение напряжения на вторичной полуобмотке.

На некоторых автомобилях блокировка включения стартера при работающем двигателе срабатывает по величине напряжения в бортовой сети. При работающем двигателе и генераторе напряжение в бортовой сети выше, чем на АКБ на холостом ходу. На легковых автомобилях напряжение в бортовой сети при работающем генераторе 13.2 – 15 В. Таким образом, среднее напряжение в бортовой сети автомобиля при подключении трансформаторного пускового устройства $U_{ххср}$ должно быть меньше 13.2 В.

В интервалах проводимости в цепи (рис. 1, 2) течет ток I_{xx} , заряжающий АКБ

$$I_{xx} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{TP} \cdot \sin(\omega t) - E_{60} - E_d}{R_{TP} + R_d + R_{60} + R_K} \quad (2)$$

Средний ток заряда $I_{ххср}$

$$I_{ххср} = \frac{1}{\pi} \int_{t_1}^{t_2} I_{xx} \cdot dt = \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot U_{TP} \cdot \cos(t_1) - (E_{60} + E_d) \cdot (\pi - 2 \cdot t_1)}{\pi \cdot (R_{TP} + R_d + R_{60} + R_K)} \quad (3)$$

Среднее напряжение на АКБ

$$U_{ххср} = E_{60} + \frac{1}{\pi} \int_{t_1}^{t_2} I_{xx} \cdot R_{60} \cdot dt = E_{60} + I_{ххср} \cdot R_{60} \quad (4)$$

Расчеты тока заряда и напряжения на АКБ по формулам (2 – 4) производились подбором допустимых значений напряжения на вторичной полуобмотке U_{TP} при $U < 13.2$ В. Учитывалось, что из-за колебаний напряжения в сети 220 В 50 Гц фактическое значение напряжения U_{TP}

может быть на 10% выше номинального или на 15% ниже.

Необходимая для расчетов информация о зависимости внутреннего сопротивления стартерных свинцово-кислотных АКБ легковых автомобилей от температуры и степени разряженности приведена в [5].

На рис. 4 и 5 представлены графики зависимостей тока заряда и напряжения на АКБ от температуры, степени разряженности АКБ (ΔC_p), напряжения на вторичной полуобмотке трансформатора.

Расчет показал, что в качестве номинальной следует выбирать величину напряжения $U_{TP} = 10$ В, тогда диапазон изменения напряжения на вторичной полуобмотке трансформатора из-за колебаний сетевого напряжения составляет 8.5 ÷ 11 В. При наименьшем значении $U_{TP} \approx 8.5$ В выпрямитель заперт и ток через АКБ не идет, при больших значениях напряжения U_{TP} происходит подзаряд батареи. Напряжение на АКБ при всех комбинациях параметров не превышает 13.2 В, и стартер не блокируется.

Потребитель не будет держать длительное время пусковое устройство подключенным к автомобилю, поэтому АКБ зарядится незначительно. Ток, проходящий через батарею, разогревает ее, уменьшая внутреннее сопротивление АКБ. Такой же эффект достигается включением в холодную погоду на короткое время фар перед пуском двигателя.

На рис. 6 представлены графики напряжения в бортовой сети автомобиля и тока через стартер в начале прокрутки, когда стартер еще заторможен. На полупериоде в интервале про-

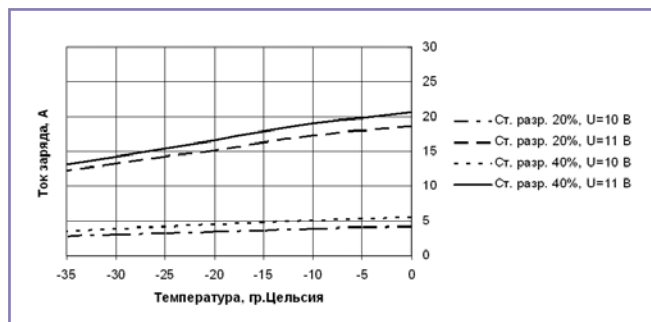


Рис. 4. Ток заряда.

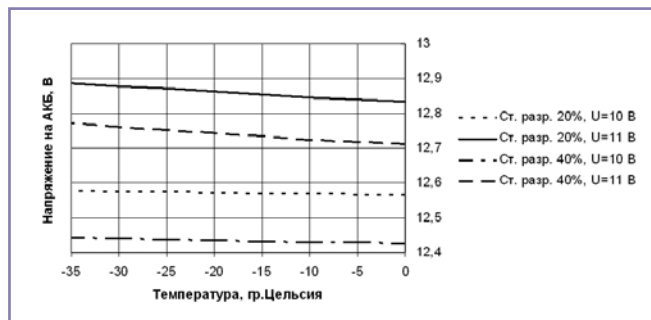


Рис. 5. Напряжение на АКБ.

водимости диодов ($t_1 \div t_2$) стартер получает энергию от выпрямителя и от АКБ, в интервале $(\pi - 2 \cdot t_1)$ — только от батареи.

Для расчета цепи на интервале проводимости диодов заменим параллельно включенные стартер и батарею эквивалентным генератором

$$E_G = E_{60} \cdot \frac{R_{CT}}{R_{CT} + R_{60}}, \quad R_G = \frac{R_{CT} \cdot R_{60}}{R_{CT} + R_{60}} \quad (5)$$

Выпрямитель работает на противо-ЭДС, его средний ток $I_{аср}$ вычислим аналогично (3)

$$I_{аср} = \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot U_{TP} \cdot \cos(t_1) - (E_G + E_d) \cdot (\pi - 2 \cdot t_1)}{\pi \cdot (R_{TP} + R_d + R_G + R_K)} \quad (6)$$

Здесь

$$t_1 = \arcsin \frac{E_G + E_d}{\sqrt{2} \cdot U_{TP}} \quad (7)$$

Вне интервала проводимости диодов стартер получает энергию только от штат-

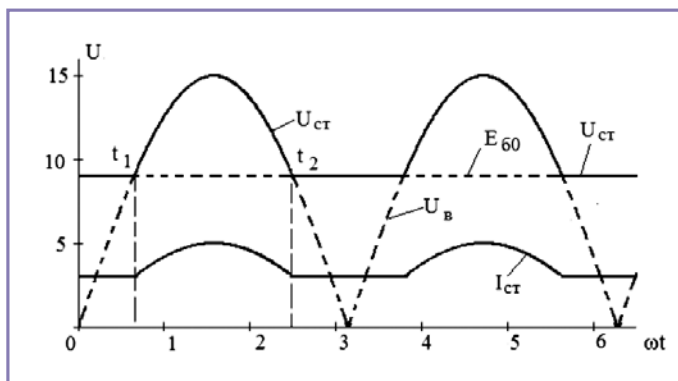


Рис. 6. Графики напряжения на АКБ и тока стартера при прокрутке.

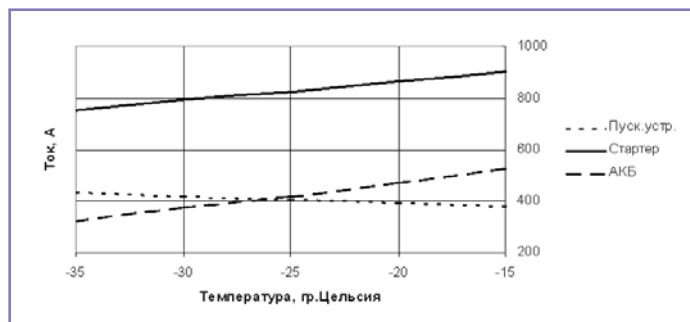


Рис. 7. Токи выпрямителя, АКБ и стартера.

ной АКБ. Получим выражение для среднего тока через заторможенный стартер

$$I_{CT} = \frac{I_{всп} \cdot R_{\Gamma} + E_{\Gamma}}{R_{CT}} + \frac{2 \cdot E_{60} \cdot t_1}{(R_{CT} + R_{60}) \cdot \pi} \quad (8)$$

В (8) первое слагаемое соответствует интервалу проводимости выпрямителя, второе – интервалу времени, когда выпрямитель закрыт.

Средний ток через батарею

$$I_B = I_{CT} - I_{всп} \quad (9)$$

В качестве примера на рис. 7 представлены зависимости токов заторможенного стартера, пускового устройства, батареи автомобиля от температуры при $\Delta C_p = 40\%$, $U_{\Gamma} = 10$ В, полученные по выражениям (6–9).

При всех комбинациях значений степени разряженности штатной АКБ и температуры внешней среды мощность, подводимая к стартеру при использовании пускового устройства, оказывается больше, чем при использовании только штатной батареи (рис. 7).

Защита от переполюсовки и короткого замыкания

Короткое замыкание выводов пускового устройства или его включение в бортовую сеть автомобиля с нарушением полярности является аварийной ситуацией, опасной для потребителя.

Аккумуляторные батареи автомобиля и пускового устройства опасно соединять параллельно без каких-либо средств защиты от нарушения полярности. Такая схема используется на практике при реализации процедуры «прикуривания». «Прикуривание» – это подключение параллельно разряженной АКБ автомобиля батареи другого автомобиля для осуществления пуска. Процедура должна выполняться в соответствии с инструкцией по эксплуатации автомобиля, подключение производится специальными гибкими силовыми кабелями с зажимами типа «крокодил». Несмотря на маркировку кабелей разным цветом, можно перепутать полярность и допустить переполюсовку.

В этом режиме через обе АКБ пойдет большой ток короткого замыкания, бата-

реи могут разрушиться, выделившийся гремучий газ способен взрываться, в окружающее пространство разлетаются брызги ядовитой серной кислоты. По данным Национальной администрации безопасности

дорожного движения (NHTSA) в США ежегодно более 400 человек получают ранения из-за взрывов АКБ при попытках «прикуривать» ([http://en.wikipedia.org/wiki/Jump_start_\(vehicle\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Jump_start_(vehicle))).

Отметим, что переполюсовка невозможна при подключении штатного аккумулятора на автомобиле, т.к. соединительные кабели не подходят к борнам другой полярности.

Если не использовать защиту от переполюсовки в трансформаторных пусковых устройствах, то при подключении пускового устройства к АКБ автомобиля с нарушением полярности диоды выпрямителя (VD7, VD8 на рис.1) будут смещены в положительном направлении и открыты, независимо от того, подано питание на сетевой трансформатор или нет. Через диоды пойдет ток короткого замыкания, который будет прерван сгоревшим предохранителем FU2. Так как предохранитель срабатывает относительно медленно, есть

немалая вероятность, что диоды VD7, VD8 также сгорят. Таким образом, в трансформаторном пусковом устройстве защита от переполюсовки необходима, и она реализована на реле K1, K2, K3.

Суперконденсатор в пусковых устройствах не нуждается в защите от переполюсовки и короткого замыкания, но эти режимы опасны для потребителя.

Пусковые устройства независимо от типа снабжаются защитой от переполюсовки и короткого замыкания.

В качестве примера на рис. 8 показан вариант схемы аккумуляторного пускового устройства с защитой от переполюсовки.

В исходном состоянии, в режиме хранения, аккумуляторная батарея пускового устройства G1 отключена от его выходных клемм и этим защищена от короткого замыкания. При этом все электронные компоненты и обмотки реле обесточены, контакты реле K1-I, K2-I, K3-I разомкнуты.

Потребитель подключает пусковое устройство к аккумуляторной батарее автомобиля под капотом, используя имеющиеся в комплекте кабели с зажимами.

В случае переполюсовки через диод VD1 включается зуммер Z1 HPE-200. Диод VD3 при переполюсовке не позволит включиться обмоткам реле K1 – K3 и АКБ автомобиля и пускового устройства не будут закорочены.

Реле K1 – K3 срабатывают при правильном подключении пускового устройства и отключаются после запуска двигателя. Для управления реле использован широко применяемый компаратор LM211

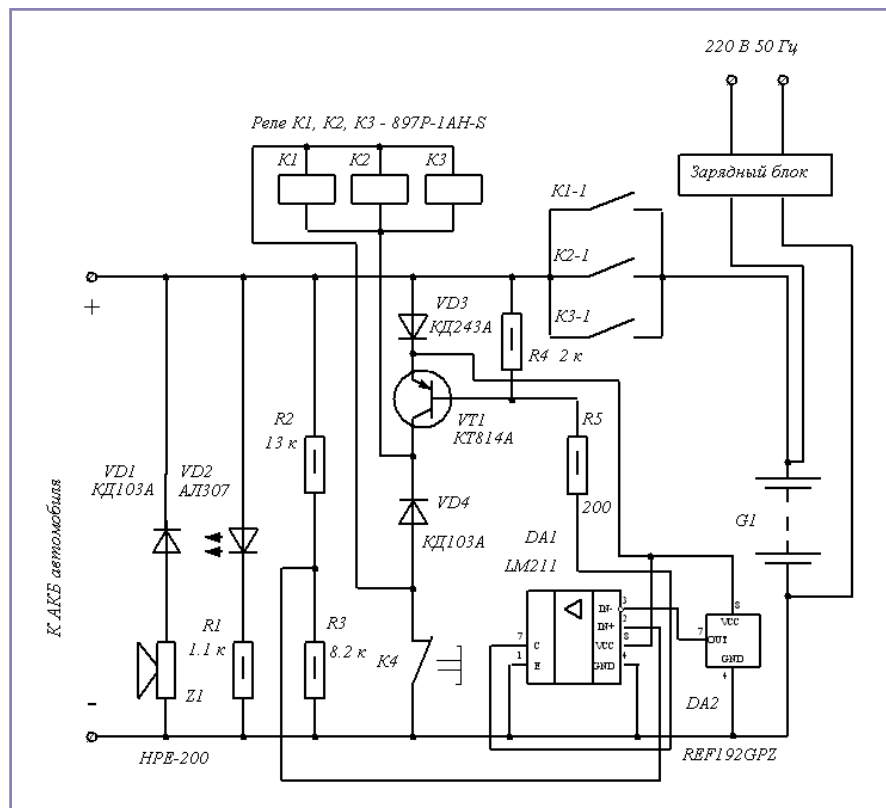


Рис. 8. Схема силовой части аккумуляторного пускового устройства с релейной защитой от переполюсовки.

совместно с силовым транзисторным ключом VT1.

Вместо электромеханических реле К1 – К3 по экономическим причинам не удастся применить более современные электронные. Через контакты реле проходит рабочий ток пускового устройства. Для легковых автомобилей в соответствии с расчетом максимальная величина тока пускового устройства достигает 450 А. Такой ток можно коммутировать с помощью тиристорных, биполярных транзисторов с изолированным затвором и электронных реле.

На сайтах торговых организаций (например, <http://www.chipdip.ru>) выясняем: тиристор с рабочим током 300 – 400 А имеет цену более 2000 рублей; на токи 450 – 500 А электронные реле серийно не производятся, можно использовать соединенные параллельно реле CMD24125 с током до 125 А, но цена одной штуки 6730 рублей; мощное малогабаритное автомобильное реле AEV19012 430 коммутирует ток до 600 А, но цена – 450 долларов.

Чтобы уложиться в ценовые требования рынка, разумно реализовать защиту от переплюсовки, применив несколько параллельно включенных маломощных автомобильных реле. Можно использовать, например, малогабаритные автомобильные реле серии 897 известного международного производителя Song Chuan стоимостью 83 рубля (http://kontakt-tru/catalog/relay_song.html). Это реле с одним нормально разомкнутым контактом, коммутируемым постоянным током до 70 А, напряжение питания обмотки 12 В, габаритные размеры 25,8x25,8x25 мм, масса 40 граммов [1].

В схеме на рис. 8 контакты реле в случае правильного подключения пускового устройства коммутируют ток холостого хода I_{xx} не более 10 А. После включения стартера рабочий ток пускового устройства, достигающий в начальный момент

величины 450 А и затем уменьшающийся, идет по уже замкнутым контактам.

При замкнутых контактах в установленном режиме в реле допускаются перегрузки по току до 150% от величины номинального тока [6], т.е. через замкнутый контакт реле серии 897 можно пропустить ток до 175 А, а для реализации схемы защиты от переплюсовки потребуется три реле серии 897 с параллельно включенными контактами.

Отметим, что при проектировании устройств, в которых реле эксплуатируются с перегрузками по току, необходимо экспериментальное исследование температуры контактов, значительно влияющей на их долговечность.

Выводы

При низких температурах увеличивается внутреннее сопротивление аккумуляторной батареи на автомобиле. Мощность, подводимая к стартеру, уменьшается. Двигатель может не запуститься.

Увеличить ток в стартере можно, подключив параллельно АКБ автомобиля на время пуска источник постоянного напряжения или конденсатор большой емкости – т.е. пусковое устройство.

В настоящее время выпускаются аккумуляторные, трансформаторные и конденсаторные пусковые устройства.

Анализ электрических процессов в бортовой сети автомобиля с подключенными пусковыми устройствами различного типа показал, что при всех комбинациях значений степени разряженности штатной АКБ и температуры внешней среды мощность, подводимая к стартеру при использовании пускового устройства, оказывается больше, чем при использовании только штатной батареи.

В пусковых устройствах обязательно применение схем защиты от короткого замыкания и переплюсовки.

Литература:

1. 897 Relays. Datasheet. Song Chuan, 2007. – 6 pp
2. Зарядные и пуско-зарядные устройства. Выпуск 2./Сост.А.Г.Ходасевич – М.: НТ Пресс, 2005.
3. Мощные полупроводниковые приборы: Дiodы: Справочник/ Под ред. А.В. Голомедова. – М.: Радио и связь, 1985. – 400 с.
4. Гейтенко Е.Н. источники вторичного электропитания. Схемотехника и расчет. Учебное пособие. – М., Солон-Пресс, 2008. – 379 с.
5. Соснин Д.А. Автотроника. Электрическое, электронное и автотронное оборудование легковых автомобилей, – М., Солон-Пресс, 2010. – 384 с.
6. Раннева Г.Г. Мощные электромагнитные реле. Справочник инженера. – С.-Петербург. 2001. – 152 с.

Яковлев Вадим Фридрихович – родился в 1953 году. В 1975 году окончил Куйбышевский политехнический институт по специальности «Информационно-измерительная техника». Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедр «Теоретическая и общая электротехника» Самарского государственного технического университета. Опыт работы 38 лет. Имеет 20 авторских свидетельств на изобретения, более 40 научных статей, 4 монографии.

Yakovlev Vadim – was born in 1953. In 1975 graduated from Kuybyshev Polytechnic Institute, specialization is «Information-measuring technology». He is a Candidate of Engineering, senior staff scientist, associate professor of «Theoretical and general electrical engineering» departments of Samara State Technical University. He has 38 year experience. He is the author of 20 author's certificate, more than 40 scientific articles, 4 monographs.

Идеальный выключатель постоянного тока

// Ideal DC switch //

Пупынин В.Н., д.т.н., профессор,
Мартюкова В.А.,
МГУПС (МИИТ), г. Москва

Пояснено понятие «идеальный выключатель постоянного тока», предложены три его возможные принципиальные схемы, рассмотрена поэтапная работа одной из них при отключении тока короткого замыкания вблизи тяговой подстанции, показаны преимущества идеальных выключателей перед существующими электромагнитными дугowymi.

Ключевые слова: идеальный выключатель без и с запаздыванием, этапы отключения короткого замыкания в цепи постоянного тока, переходный процесс, ограничитель перенапряжений, диодное разрядное устройство.

Понятие идеального выключателя сформулировано в учебнике «Тяговые подстанции» [1, стр. 124]. В соответствии с [1] под идеальным понимается выключатель, в котором мгновенно, в момент достижения током уставки защиты, или же спустя некоторое время, называемое временем запаздывания, в цепь мгновенно вводится встречное напряжение в c раз большее, чем напряжение источника питания (согласно ГОСТ на выключатели [2] $3 \geq c > 1$). Выключатели без времени запаздывания именуются собственно идеальными, а с временем запаздывания – идеальными с запаздыванием. Особое свойство и тех и других выключателей заключается в том,

To explain the concept of the «perfect DC switch», we offer three possible concepts, consider a phased work of one of them when the short-circuit current is switched off at the traction substation. The advantages of the ideal switch over the existing electromagnetic arc-displayed are.

Keywords: the ideal switch and without delay, steps off a short circuit in the DC circuit, transients, surge suppressor, the diode discharge device.

что процесс ограничения ими тока в отключаемой цепи начинается сразу же в момент подачи встречного напряжения, т.е. коэффициент ограничения тока в отключаемой цепи, равный отношению максимального значения тока через выключатель к току уставки, равен 1 для идеального выключателя, и не-

сколько больше 1, но существенно меньше, чем у используемых дугowych электромагнитных выключателей, – у идеальных выключателей с запаздыванием.

При анализе процессов отключения идеальных выключателей выяснилось, что роль встречного напряжения в них может выполнять ограничитель перенапряжения (ОПН). Почему и каким образом это происходит, будет показано ниже, где рассмотрены три возможные реальные схемы идеальных выключателей постоянного тока (рис. 1).

На рис. 1 а, б и в обозначено:

ВДК – вакуумная дугогасительная камера главной цепи;

ВДК_к – вакуумная дугогасительная камера коммутирующей цепи;

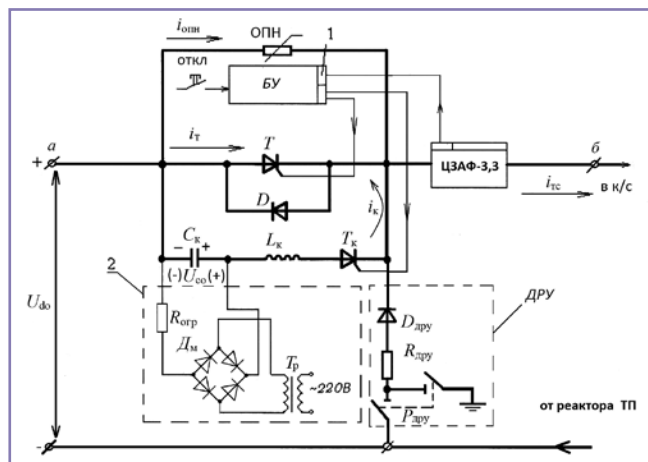


Рис. 1б.

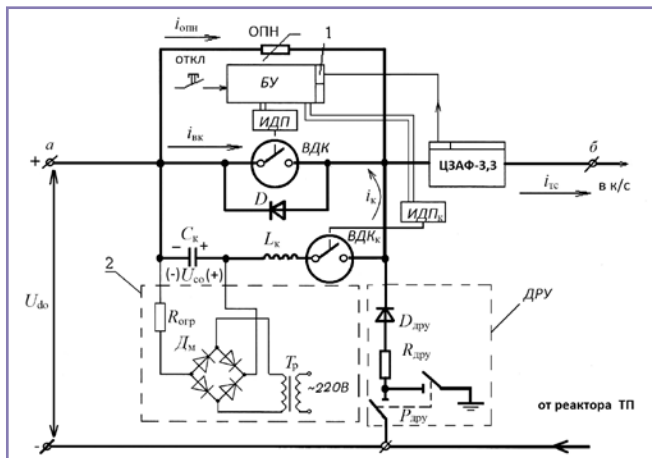


Рис. 1а.

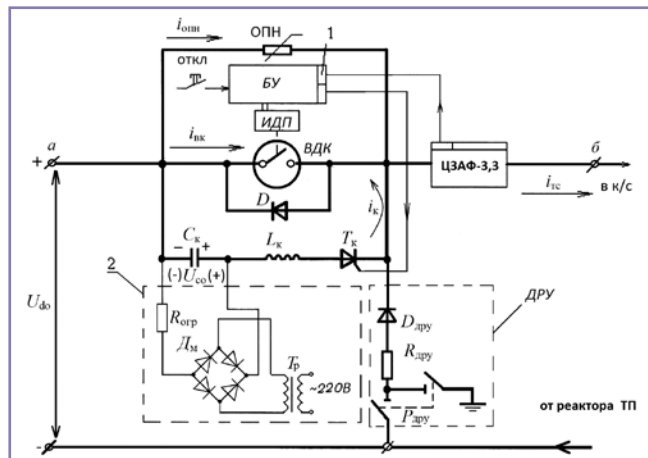


Рис. 1в.

ЦЗАФ-3,3 – микропроцессорное устройство защиты контактной сети;

ОТКЛ – кнопка отключения выключателя со щита управления тяговой подстанции;

БУ – блок управления;

ИДП – индукционно-динамический привод вакуумной камеры главной цепи;

ИДП_к – индукционно-динамический привод вакуумной камеры коммутирующей цепи;

D – шунтирующий диод;

T_1 – тиристор главной цепи;

T_k – тиристор схемы коммутирующей цепи;

C_k, L_k – соответственно емкость и индуктивность коммутирующей цепи;

U_{d0} – напряжение холостого хода на шинах 3,3 кВ тяговой подстанции;

U_{c0} – начальное напряжение на емкости C_k ;

ОПН – ограничитель перенапряжений;

ДРУ – диодное разрядное устройство;

$R_{дру}$ – резистор ДРУ;

$D_{дру}$ – диод ДРУ;

$T_{пру}$ – повышающий трансформатор;

$R_{огр}$ – ограничительный резистор;

D_m – диодный мост;

i_{tc} – ток в тяговой сети;

$i_{вк}$ – ток через ВДК;

$i_{тк}$ – ток через тиристор главной цепи;

$i_{кк}$ – ток в коммутирующей цепи;

$i_{опн}$ – ток через ОПН;

В первой схеме (рис. 1а) роль главных контактов выключателя и роль ключа в цепи коммутации выполняют вакуумные дугогасительные камеры переменного тока ВДК.

Во второй схеме (рис. 1б) и роль главных контактов, и роль ключа в цепи коммутации выполняют тиристоры.

В третьей схеме (рис. 1в) роль главных контактов выполняет ВДК, а роль ключа в цепи коммутации – тиристор.

Работа всех трех схем идентична. Принципиально она сводится к тому, что в рабочем состоянии ток в тяговую сеть i_{tc} протекает через главную цепь. Выключатель отключается автоматически или вручную со щита управления тяговой подстанцией посредством замыкания коммутирующей цепи.

Ток коммутации $i_{кк}$, представляющий собой ток разряда предварительно заряженной емкости C_k , по значению больший, чем ток в тяговой сети, протекает через главную цепь, доводит ток в ней до нуля и тем самым переключает ток в тяговой сети в цепь коммутации. Начиная протекать по цепи коммутации, ток тяговой сети практически мгновенно перезаряжает конденсатор C_k до максимально допустимого значения 10÷12 кВ, в результате чего открывается цепь ОПН и ток тяговой сети начинает протекать через ОПН, поддерживая на зажимах выключателя напряжение 10÷12 кВ. Таким образом, по сути дела напряжение на ОПН является мгновенно появляющимся встречным напряжением, делающим выключатель идеальным выключателем. Соответственно, в момент подключения ОПН ток в тяговой сети перестает возрастать, ограничивается и сводится к нулю.

При ближайшем рассмотрении схем оказалось, что наиболее простым и компактным решением идеального выключателя будет вакуумно-тиристорный выключатель, представленный на схеме рис. 1в. Именно схема работы такого идеального выключателя с минимальным временем запаздывания поэтапно рассмотрена ниже.

Номера этапов, для которых определяется ток, будем показывать верхним индексом в обозначении тока, а нижним индексом в обозначении тока указывать буквой н – начальное, а буквой к – конечное значение тока.

I этап: Схема ВТВПТ-4/5 находится в исходном состоянии (рис. 1в), контакты ВДК замкнуты, в тяговой сети происходит короткое замыкание. Идет процесс нарастания тока к.з. в тяговой сети i_{tc} до значения тока уставки I_y ЦЗАФ-3,3. Схему цепи на первом этапе (рис. 2), где:

U_{d0} – напряжение холостого хода на шинах 3,3 кВ тяговой подстанции;

i_{tc} – ток тяговой сети;

$i_{вк}$ – ток через ВДК;

L_n, R_n – соответственно индуктивность и активное сопротивление подстанции;

L_p, R_p – соответственно индуктивность и активное сопротивление реактора;

L_{tc}, R_{tc} – соответственно индуктив-

ность и активное сопротивление тяговой сети;

Известно, что при включении $R-L$ цепи постоянного тока ток в цепи изменяется по закону

$$i_{вк}^I(t) = I_{\infty} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (1)$$

где $I_{\infty} = \frac{U_{d0}}{R_{\Sigma}}$ – установившееся значение тока короткого замыкания;

$R_{\Sigma} = R_n + R_p = R_{tc}$ – суммарное активное сопротивление цепи к.з.;

$L_{\Sigma} = L_n + L_p = L_{tc}$ – суммарное индуктивное сопротивление цепи к.з.

Ток к.з. достигает значения тока уставки I_y ЦЗАФ-3,3 за время t_1 [1]

$$t_1 = \tau \cdot \ln \left(\frac{I_{\infty}}{I_{\infty} - I_y} \right) \quad (2)$$

II этап: Ток короткого замыкания продолжает нарастать в течение времени t_2 , являющегося суммой времен срабатывания блока микропроцессорной защиты (1 мс) и индукционно-динамического привода (1 мс). Таким образом, $t_2 = 2$ мс. Схема цепи к.з. остается такой же, как на первом этапе (рис. 2).

Значение тока к.з. в конце II этапа определяется по формуле (3) при времени $t = t_1 + t_2$

$$i_{вк}^{II}(t) = I_{\infty} (1 - e^{-\frac{t_1+t_2}{\tau}}) \quad (3)$$

III этап: Ток к.з. нарастает, контакты ВДК размыкаются и между ними загорается электрическая дуга. Схема цепи к.з. остается такой же, как на первом этапе. Длительность III этапа определяется таким образом, чтобы к концу этапа контакты ВДК точно разошлись, и между контактами уже горела дуга. В конце III этапа открывается T_k тиристор коммутирующей цепи.

Примем время от зажигания дуги в ВДК до открытия тиристора T_k равным 1 мс ($t_3 = 1$ мс).

Тогда ток в конце III этапа будет равен

$$i_{вк}^{III}(t) = I_{\infty} (1 - e^{-\frac{t_1+t_2+t_3}{\tau}}) \quad (4)$$

IV этап: Открывается тиристор коммутирующей цепи T_k и конденсатор C_k , предварительно заряженный от подзарядного устройства (блок 2, рис. 1), начинает разряжаться через ВДК током $i_{вк}$ встречно идущему по ней току i_{tc} . Спустя некоторое время ток через ВДК становится равным нулю (рис. 3а).

На рис. 3а U_{d0} , i_{tc} , $i_{вк}$, L_n , R_n , L_p , R_p , L_{tc} , R_{tc} то же, что и на рис. 2

U_{c0} – начальное напряжение на емкости (знаки без скобок);

$i_{вк}$ – ток через ВДК;

$i_{кк}$ – ток коммутирующей цепи;

C_k, L_k – соответственно емкость и индуктивность коммутирующей цепи.

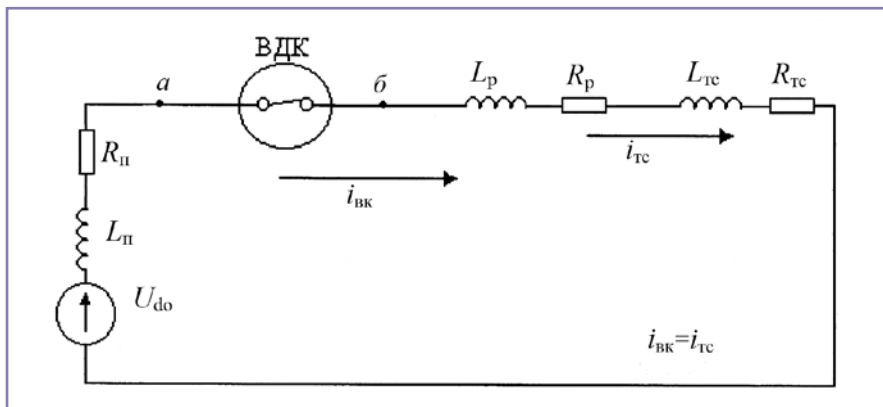


Рис. 2. Схема цепи к.з. на первом, втором и третьем этапах.

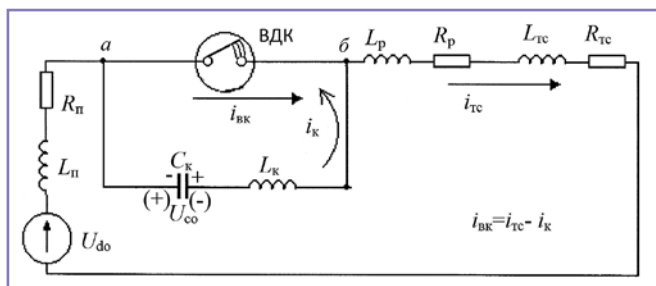


Рис. 3а. Начальная схема цепи к.з. на четвертом этапе.

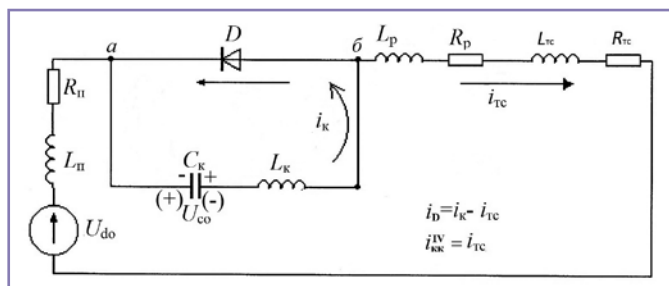


Рис. 3б. Конечная схема цепи к.з. на четвертом этапе.

Когда дуга в ВДК гаснет, разряд конденсатора C_k продолжается через диод D (рис. 3б).

На рис. 3б: D – шунтирующий диод; i_D – ток через диод.

Переходный процесс на четвертом этапе описывается формулой (5)

$$i_k^{IV}(t) = \frac{U_{c0}}{L_k} \sqrt{L_k C_k} \sin \omega_k t = U_{c0} \sqrt{\frac{C_k}{L_k}} \sin \omega_k t = \frac{U_{c0}}{\rho} \sin \omega_k t \quad (5)$$

где $\rho = \sqrt{\frac{C_k}{L_k}}$ – волновое сопротивление цепи $C_k - L_k$ (6)

Надо считать, что процесс коммутации завершается тогда, когда ток через ВДК равен 0 ($i_{вк} = 0$), т.е. когда $i_k = i_{тс}$. Время IV этапа, при котором $i_{кн}^{IV}(t) = i_{вк}^{III}$, определим из соотношения

$$i_{вк}^{III} = \frac{U_{c0}}{\rho} \sin \omega_k t_4$$

$$\text{откуда } t_4 = \frac{1}{\omega_k} \arcsin \left(\frac{i_{вк}^{III}}{\frac{U_{c0}}{\rho}} \right) \quad (7)$$

где $\omega_k = \frac{1}{\sqrt{L_k C_k}}$ – круговая частота периодической составляющей

тока перезаряда конденсатора.

V этап: ток через ВДК не протекает (камера оказывается закрытой для тока). Т.к. $L_{п}$ и $L_{к}$ ничтожно малы по сравнению с $L_{п}$ ими пренебрегаем. Идет процесс перезаряда емкости C_k , в которую переходит энергия, запасенная в $L_{п}$ и $L_{тс}$. Теоретически гашение тока к.з. может произойти на этом этапе, однако при условии, что при подходе тока в цепи к нулю, напряжение на емкости не превысит 10 кВ.

Выражение для тока $i_{тс}$ на V этапе описывается выражением

$$i_{тс}^V(t) = (U_{d0} - i_{тс}^{IV} \frac{R_{\Sigma}}{2}) \times \sqrt{\frac{C_k}{L_{\Sigma}}} \sin \omega_k t + i_{тс}^{IV} e^{-\frac{t}{2\tau}} \cos \omega_k t \quad (8)$$

На рис. 4 U_{d0} , U_{c0} , $i_{тс}$, C_k , $L_{п}$, $R_{п}$, $L_{п}$, $R_{п}$, $L_{тс}$, $R_{тс}$ то же, что и на рис. 3а.

Напряжение, при котором открывается ОПН (10÷12 кВ), мало по сравнению со значением напряжения, до которого зарядилась бы емкость C_k , если бы в нее перешла вся энергия, запасенная в индуктивностях цепи к.з. (рис. 5). Поэтому из рис. 5 видно, что время открытия ОПН менее 0,01 мкс, т.е. можно считать, что ОПН включается практически мгновенно, что дает основание считать, что схема максимально приближена к идеальному выключателю.

VI этап: ОПН открывается и шунтирует коммутирующий кон-

денсатор C_k . Для расчетов примем стандартную схему замещения ОПН по рис. 6, где $U_{опн}$ – напряжение включения (открытия) ОПН; $R_{опн}$ – сопротивление ОПН; $D_{опн}$ – диод ОПН.

Примем для упрощения расчетов будем приближенно считать, что $R_{опн} = 0$. Энергия, накопленная в индуктивности цепи к.з. $L_{п}$, $L_{п}$ и $L_{тс}$, разряжается через ОПН и рассеивается в активных сопротивлениях цепи к.з. по рис. 6. На этом этапе продолжается постепенное затухание тока в тяговой сети до нуля.

На рис. 6 U_{d0} , $i_{тс}$, $L_{п}$, $R_{п}$, $L_{п}$, $R_{п}$, $L_{тс}$, $R_{тс}$ то же, что и на рис. 4.

Переходный процесс изменения тока на шестом этапе описывается формулой (9)

$$i_{тс}^{VI}(t) = \frac{U_{d0}(1-c)}{R_{\Sigma}} \times (1 - e^{-at}) + i_{тс}^{VI} e^{-at} \quad (9)$$

Приведем примерный расчет и найдем кривую отключения тока к.з. вблизи тяговой подстанции при следующих параметрах тяговой сети

$$L_{\Sigma} = L_{п} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ Гн};$$

$$R_{\Sigma} = R_{п} + R_{п} = 0,048 + 0,008 = 0,056 \text{ Ом}$$

$$c = 3; a = \frac{R_{\Sigma}}{L_{\Sigma}} = 9,3 \frac{1}{\text{с}}, U_{опн} = c \cdot U_{d0}$$

Кривая изменения тока в цепи от начала к.з. до завершения отключения показана на рис. 7.

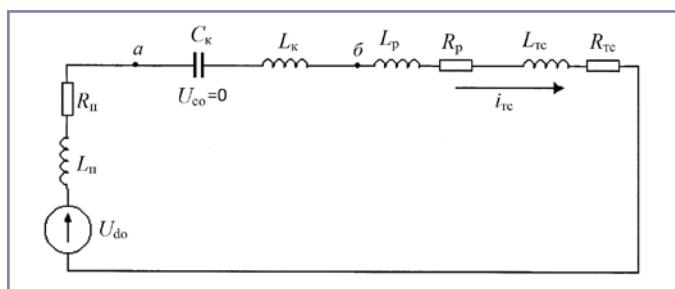


Рис. 4. Схема к.з. на пятом этапе.

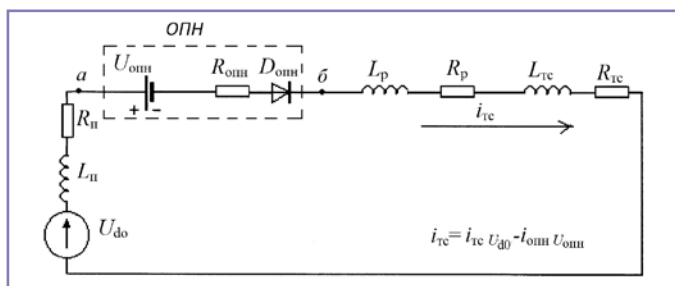


Рис. 6. Схема к.з. на шестом этапе.

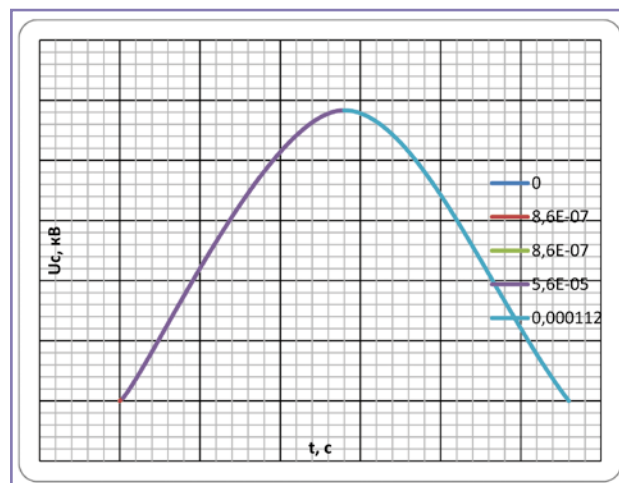


Рис. 5.

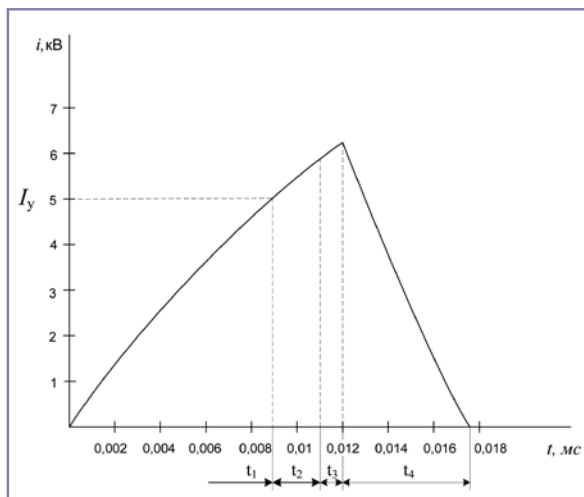


Рис. 7. Отключение тока к.з. вблизи тяговой подстанции.

VII этап: Рассмотрим процесс влияния на работу выключателя диодного разрядного устройства (ДРУ).

На рис. 8 $U_{до}$, $U_{опн}$, $i_{тс}$, $L_{п'}$, $R_{п'}$, $L_{р'}$, $R_{р'}$, $L_{тс}$, $R_{тс}$, $R_{опн}$, $D_{опн}$ то же, что и на рис. 4:
 $i_{опн}$ – ток через ОПН;
 $R_{дру}$ – резистор ДРУ;
 $D_{дру}$ – диод ДРУ;

Ясно, что при $R_{дру} = \infty$ его фактически не существует, и тогда процесс отключения цепи к.з. с таким ДРУ аналогичен рассмотренному на шестом этапе. На рис. 9а процесс отключения цепи к.з. при $R_{дру} = \infty$, т.е. без ДРУ, показан жирной линией. Ток через ДРУ в этом случае показан тонкой пунктирной линией. Ток же в тяговой сети в этом случае, очевидно, повторяет ток через ОПН.

Легко показать, что этом случае в момент подключения ОПН сразу же начинает работать ДРУ. Это означает, что схема (рис. 8) распадается на два независимых контура: контур тяговой сети через ДРУ с током $i_{тс}$ и контур тока через ОПН с током $i_{опн}$, причем в любой момент времени $t > 0$ $i_{тс} > i_{опн}$, поэтому $i_{опн}$ протекает через $D_{дру}$ в обратном направлении (суммарный ток через $D_{дру}$ всегда больше нуля и идет снизу вверх!). При этом законы изменения тока в каждом контуре свои. Ток $i_{тс}$ спа-

дает с постоянной времени $\tau = \frac{L_{тс}}{R_{тс}}$, а $i_{опн}$ очень интенсивно падает к нулю, так как поддерживается только малой индуктивностью контура $L_{п}$ (рис. 9б). Другими словами при $R_{дру} = 0$ работа ОПН максимально облегчена и мощность варисторов ОПН может быть незначительна, и это хорошо. Однако ток в тяговой сети при этом затухает очень медленно и через место дугового к.з. в тяговой сети будет долго протекать ток $i_{тс}$ и приносить к месту к.з. большее количество амперсекунд тока, что может быть причиной пережога проводов контактной сети в месте к.з. – и это плохо! Поэтому на практике следует выбирать разумное значение $R_{дру} > 0$.

Рабочая схема разработанного «идеального» выключателя постоянного тока с запаздыванием, соответствующая принципиальной схеме (рис. 1в), может быть собрана на базе структурных элементов, выпускаемых отечественной промышленностью.

Литература:

1. Бей Ю.М., Мамошин РР., Пупынин В.Н., Шалимов М.Г. Тяговые подстанции / Учебник для вузов ж.д. транспорта. – М. – Транспорт, 1986 г. Быстродействующие выключатели постоянного тока. ГОСТ 2585 – 69.

Пупынин Владимир Николаевич – родился в 1927 году. Окончил Московский электромеханический институт инженеров транспорта (МЭМИИТ). Защитил диссертацию на соискание степени доктора технических наук по теме:

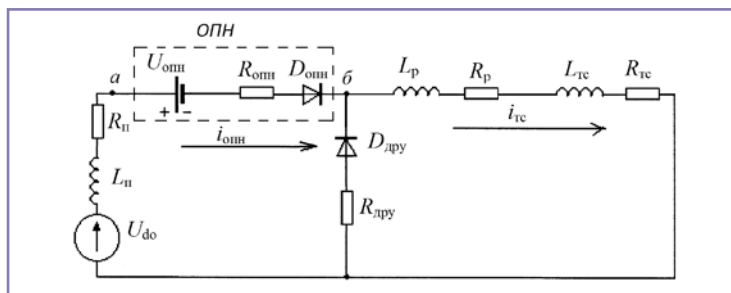


Рис. 8. Схема к.з. на седьмом этапе.

«Защита и отключение тяговых сетей в аварийных режимах». Профессор, академик Академии транспорта РФ. В настоящее время занимает должность профессора кафедры «Энергоснабжение электрических железных дорог» МИИТа. Имеет более 260 публикаций, в том числе более 120 авторских свидетельств и патентов на изобретения. Почетный железнодорожник. Почетный работник транспорта и связи г. Москвы.

Мартюкова Виктория Алексеевна – родилась в 1991 году. Окончила Московский Государственный Университет путей сообщения (МИИТ) в 2013 году по специальности «Электроснабжение железных дорог», защитив дипломный проект на тему: «Вакуумно-тиристорный выключатель постоянного тока». В настоящее время аспирантка кафедры «Энергоснабжение электрических железных дорог» МИИТа.

Pupynin Vladimir – born 1927. He graduated from the Moscow Institute of Transport Engineering Electromechanical (MEMIT). He defended his thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences on the subject: «The protection and disabling traction networks in emergency conditions.» Professor, Academician of the Academy of Transport of the Russian Federation. He currently holds the position of professor of the department «Power supply of electric railways» MIIT. He has more than 260 publications, including more than 120 patents for inventions. Honored Railway Worker. Honorary Worker of Transport and Communications of Moscow.

Martyukova Victoria – born in 1991. She graduated from the Moscow State University of Railway Engineering (MIIT) in 2013 majore in «Power of railways», defended a in thesis project on «Vacuum-thyristor DC switch.» Currently, post-graduate student «Energy supply electric railways» MIIT.

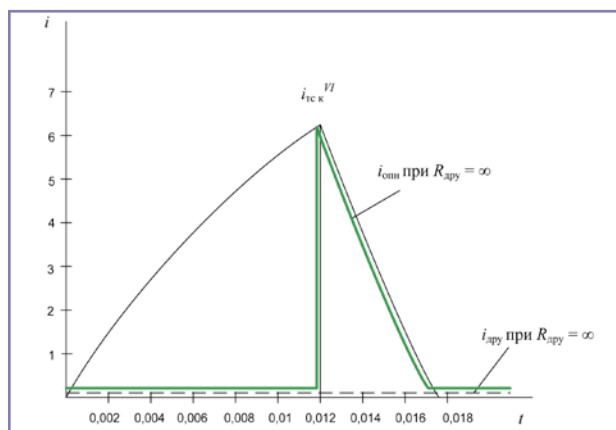
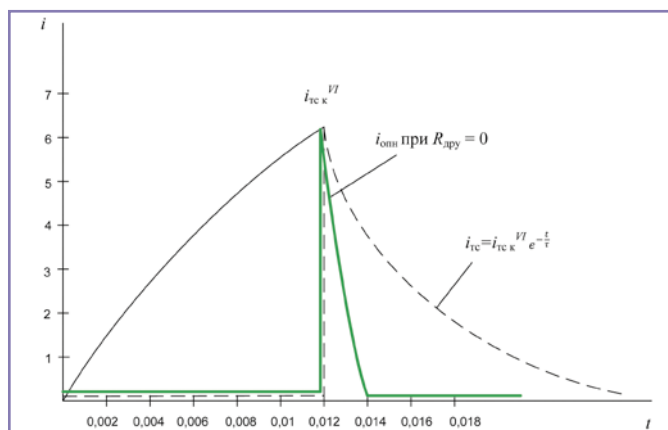


Рис. 9: Процесс отключения цепи: а) $R_{дру} = \infty$;



б) $R_{дру} = 0$.

Влияние режима работы подвижного состава метрополитена на его энергетические показатели

// Influence of the operating mode of the rolling stock of metro on its power indicators //

Логинова Е.Ю., д.т.н., профессор,
Коваленко А.В.,
МГУПС (МИИТ), г. Москва

Выполнено численное моделирование режимов движения поезда с тяговым асинхронным электродвигателем. Предложена интегральная оценка показателей энергетической эффективности работы тягового оборудования вагона метро.

Ключевые слова: подвижной состав, тяговый асинхронный электродвигатель, рекуперативное торможение, энергетическая эффективность.

The numerical simulation of the movement modes of the train with the traction asynchronous electric motor is executed. The integrated estimation of the indicators of energy efficiency of the performance of the traction equipment of the metro car is offered.

Keywords: rolling stock, traction asynchronous electric motor, regenerative braking, energy efficiency.

В условиях работы метрополитена основным критерием эффективности работы является выполнение графика движения поездов. Однако вопросы затрат энергии подвижным составом (ПС) при его эксплуатации также имеют большое значение в условиях самокупаемости городского транспорта. Поэтому эффективность работы ПС метрополитена должна оцениваться комплексно по двум критериям, т.е. график движения поездов должен выполняться при минимизации затрат электроэнергии.

На настоящий момент привод с асинхронным тяговым двигателем (АТД) является безальтернативным для ПС метрополитена. В связи этим приведенные ниже выкладки и результаты численного моделирования относятся к ПС этого типа. Наряду с простотой в обслуживании асинхронный двигатель обладает несомненным преимуществом в реализации оптимальных режимов работы по экстремумам П- или U-образных характеристик. Это позволяет обеспечить работу всего силового оборудования энергетической цепи моторного вагона метро с минимальными значениями тока, а соответственно

максимальными значениями КПД. Такой режим работы энергетического оборудования позволяет снизить его весогабаритные показатели, стоимость преобразовательных систем и негативные воздействия от ПС на путь.

С другой стороны АТД очень чувствителен к алгоритму управления и незначительное отклонение от него или изменение состояния самого объекта, например, повышение температуры обмотки ротора может привести к существенному снижению КПД электрической машины. Поэтому в данной работе выполнена сравнительная оценка энергетических показателей работы ПС метрополитена при различных алгоритмах управления электродвигателем.

Предполагалось, что моторные вагоны оборудованы тяговыми двигателями серии ДАТЭ2-170-4У2, технические характеристики которых приведены в таблице 1.

Математическая модель асинхронного двигателя, работающего в энергетической цепи моторного вагона в двигательном режиме, базируется на основных зависимостях [1, 2]

Таблица 1. Основные номинальные технические параметры ДАТЭ2-170-4У2.

Мощность на валу, кВт	Напряжение линейное, В	Ток фазный, А	Частота питающего напряжения, Гц	КПД, %	Скольжение, %	Момент на валу, Н.м
170,0	530,0	225,0	43,4	93,2	1,39	1260,0

$$\left\{ \begin{aligned} f_{1j} &= \frac{f_p}{1-s}; \\ I_2' &= \frac{U_{li}}{Z}; \\ Z &= \sqrt{\left[\left(r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (x_1 + x_2')^2 \right]}; \\ I_0 &= \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0p}^2}; \\ I_{0p} &\approx I_\mu; \\ I_{0a} &\approx \frac{\Delta P_{CT1} + m_1 \cdot I_\mu^2 \cdot r_1 + \Delta P_{MEX}}{m_1 \cdot U_{li}}; \\ \cos \varphi_2' &= \frac{R}{Z}; \\ I_{1a} &= I_{0a} + I_2' \cdot \cos \varphi_2'; \\ I_{1p} &= I_{0p} + I_2' \cdot \sin \varphi_2'; \\ I_1 &= \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}; \\ P_1 &= m_1 \cdot U_{li} \cdot I_{1a}; \\ P_{\Sigma M} &= \frac{m_1 \cdot U_{li}^2 \cdot r_2'}{s \cdot \left[\left(r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (x_1 + x_2')^2 \right]}; \\ P_2 &= P_{\Sigma M} - \Delta P_{\Sigma L2} - \Delta P_{CT2} - \Delta P_{CT2}^{ДОБ} - \Delta P_{MEX} - \Delta P_{ДОБ}^{НАГР}; \\ M_2 &= \frac{P_2}{2 \cdot \pi \cdot n_p}, \end{aligned} \right. \quad (1)$$

где f_p , U_{li} – значения частоты и амплитуды фазного напряжения, формируемые системой управления АТД; f_p – механическая частота вращения ротора; s – относительное скольжение ротора; I_1 , I_{1a} , I_{1p} – ток обмотки статора и его активная и реактивная составляющие; I_0 , I_{0a} , I_{0p} – ток холостого хода, его активная и реактивная составляющие; I_μ – ток намагничивания; m_1 – число фаз обмотки статора; P_1 – активная составляющая электрической мощности двигателя; $P_{\Sigma M}$ – электромагнитная мощность; n_p – механическая частота вращения ротора; R , Z – активное и полное сопротивление цепи намагничивания; r_1 , x_1 – активное и реактивное сопротивления фазы обмотки статора; r_2' , x_2' – приведенные значения активного и реактивного сопротивления фазы обмотки ротора; ΔP_{CT1} , ΔP_{CT2} , $\Delta P_{CT2}^{ДОБ}$, $\Delta P_{ДОБ}^{НАГР}$, ΔP_{MEX} – потери

мощности двигателя: электрические, в стали, добавочные в стали, добавочные при нагрузке, механические; P_2 – механическая мощность двигателя; M_2 – механический момент двигателя.

При переходе в режим торможения модель АТД как элемента энергетической цепи моторного вагона меняется, так как наряду с контактной сетью источником для работы энергетической цепи является кинетическая энергия движения поезда. В этом случае модель базируется на методике расчета характеристик асинхронной машины в генераторном режиме работы [3] с использованием векторной диаграммы (рис. 1)

$$\left\{ \begin{aligned} f_1 &= \frac{f_p}{1+s}; \\ z_2' &= \sqrt{r_2'^2 + x_2'^2}; \\ I_2' &= \frac{E_1}{z_2'}; \\ \varphi_2' &= \arctan\left(-\frac{s \cdot x_2'}{r_2'}\right); \\ \theta &= \arcsin\left(\frac{\Delta P_{CT1} + m_1 \cdot I_2'^2 \cdot r_1 + \Delta P_{MEX}}{m_1 \cdot E_1 \cdot I_0}\right); \\ \varphi_E' &= \arctan\left(\frac{I_0 + I_2' \cdot \sin(\varphi_2' - \theta)}{I_2' \cdot \cos(\varphi_2' - \theta)}\right); \\ \varphi_E &= \varphi_E' + \theta; \\ I_1 &= I_2' \cdot \frac{\cos(\varphi_2' - \theta)}{\cos(\varphi_E)}; \\ \varphi_U &= \arctan\left(\frac{I_1 \cdot (x_1 \cdot \cos \varphi_E + r_1 \cdot \sin \varphi_E)}{E_1 + I_1 \cdot (x_1 \cdot \sin \varphi_E - r_1 \cdot \cos \varphi_E)}\right); \\ U_1 &= \frac{I_1 \cdot (x_1 \cdot \cos \varphi_E + r_1 \cdot \sin \varphi_E)}{\sin \varphi_U}; \\ \varphi_1 &= \pi - (\varphi_E + \varphi_U); \\ P_2 &= 3 \cdot E_1 \cdot I_2' \cdot \cos(\pi - \varphi_2'); \\ P_1 &= 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1; \\ M_2 &= \frac{P_2}{2 \cdot \pi \cdot n_p}, \end{aligned} \right. \quad (2)$$

где E_p , f_1 – значение ЭДС, наведенной в фазе обмотки статора, и ее частоты; φ_2' , θ , φ_E' , φ_E , φ_U , φ_1 – углы ориентации векторов токов, напряжения и ЭДС на векторной диаграмме асинхронного двигателя в генераторном режиме работы.

С использованием (1) и (2) выполнялось моделирование режимов движения ПС метрополитена на эталонном участке длиной 1700 м. Все расчеты проводились для поезда, состоящего из пяти вагонов (два моторных головных вагона с кабиной машиниста типа 81-740.1 и три моторных промежуточных вагона типа 81-741.1) с максимальной пассажирской нагрузкой, равной 126 т.

Поезд рассматривался как нерастяжимая нить, что позволило определять дополнительное сопротивление от уклона и кривых для каждого вагона в соответствии с [4]. Кинематические характеристики

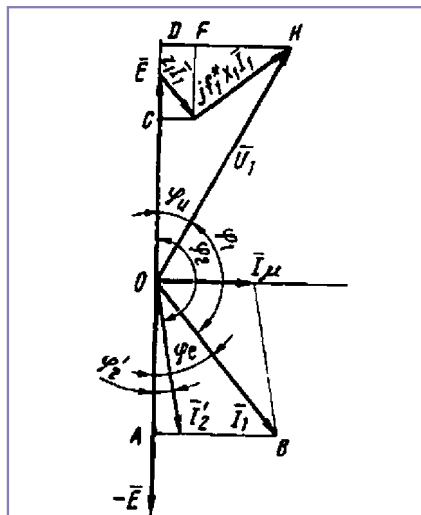


Рис. 1. Векторная диаграмма асинхронной машины в генераторном режиме работы.

ки движения поезда и его параметры задавались в соответствии с руководством по эксплуатации вагонов метрополитена с асинхронным тяговым приводом (таблица 2) [5]. Адекватность модели проверялась по параметрам режимов движения ПС метрополитена, приведенных в [5] и технических требованиях к новым вагонам метрополитена [6].

При моделировании предполагалось, что тяговый двигатель работает от идеального инвертора, выходное напряжение которого можно разложить в ряд гармонических составляющих [3]. При этом значение фазного напряжения можно представить как

$$u_\phi(t) = \frac{2}{\gamma \pi} U_d \sum_{k=5}^{\infty} \sin(\gamma \omega t + \psi_\gamma), \quad (3)$$

где U_d – постоянная составляющая выпрямленного напряжения; $\gamma = 1, 5, 7, 11, 13$ – номер гармонической составляющей; ω – угловая частота напряжения первой гармоники; ψ_γ – угол смещения γ -й гармоники относительно первой.

Алгоритмом управления обеспечивалась работа двигателя по экстремумам П-образных характеристик со следующими ограничениями

$$\left\{ \begin{aligned} I_1 &\leq k_I \cdot I_1^{HOM}; \\ U_{1i} &\leq U_1^{HOM}; \\ s_j &\leq s_{KP}; \\ \Phi &\leq \Phi^{HOM}; \\ P_1 &\leq P_1^{HOM}; \\ M_2 &\leq M_2^{HOM}, \end{aligned} \right. \quad (4)$$

где k_I – коэффициент допустимого превышения током обмотки статора номинального значения; I_1^{HOM} , U_1^{HOM} , Φ^{HOM} , P_1^{HOM} , M_2^{HOM} – номинальные значения фазного напряжения, тока статора, магнитного потока, активной мощности и момента на валу соответственно; s_{KP} – критическое скольжение.

Моделирование режимов движения поезда выполнялось по единой схеме «Разгон – движение с заданной (допустимой) скоростью – торможение» в соответствии с заданным алгоритмом управления.

Условием выхода из режима разгона являлось достижение двигателем номинальной мощности $P_2^{HOM} = 170,0$ кВт. Если скорость движения при P_2^{HOM} превышала допустимую $V_{доп} = 80$ км/ч, поезд переходил на режим вы бега или стабилизации, при котором скорость поддерживалась в пределах $80 \pm 0,5$ км/ч. Алгоритм управления обеспечивал остановочное торможение ПС в конце эталонного участка. При скорости движения более 7 км/ч энергетическая система ПС работала в режиме рекуперативного торможения (РТ); когда на режиме торможения скорость снижалась до 7 км/ч, происходило переключение с электрического торможения на пневматическое.

Расчет энергетических показателей движения ПС выполнялся для двух различных алгоритмов управления.

В соответствии с первым алгоритмом управления электроприводом ПС на режимах тяги ток обмотки статора двигателя ограничивается номинальным значением, а на режимах торможения допускается работа с током, в 1,5 раза превышающим номинальное значение, т.е.

$$k_I = \begin{cases} 1,0 & \text{в режиме тяги} \\ 1,5 & \text{в режиме торможения} \end{cases} \quad (5)$$

Таблица 2. Основные характеристики новых вагонов метрополитена.

Наименование характеристики	Значение характеристики	
	81-740.1	81-741.1
Ширина колеи, мм	1520	1520
Длина вагона по плоскостям автосцепки, мм	27820	26900
Масса тары вагона, т	47	46
Максимальная пассажирская нагрузка вагона, кг; (при вместимости 8 чел/м2 и средней массе пассажира 70 кг)	24,1	25,9
Инерциальная вращающаяся масса, т	5,3	5,3
Конструкционная скорость, км/ч	90	90
Количество тележек моторных/поддерживающих	2/1	2/1
Число движущих осей моторной тележки	2	2

Таблица 3. Характеристики перегона Белорусская–Динамо Замоскворецкой линии.

Ограничение скорости	Ограничение длины участка, м	Длина перегона, м
80	1802,6	2162,5
60	2362,5	
Уклон	Граница уклона, м	Длина элемента, м
-3	271,6	271,6
-6	563,6	292,0
3	2238,6	1598,9
Радиус кривизны	Граница радиуса, м	Длина элемента, м
0	459,44	459,44
1500	545,23	85,79
0	1111,54	566,31
1500	1431,49	319,95
0	1550,35	118,86
1475	1896,09	345,74
0	2262,5	266,41

Вторым алгоритмом управления на всех режимах работы двигателя ток ограничивается номинальным значением:

$$k_I = \begin{cases} 1,0 & \text{в режиме тяги} \\ 1,0 & \text{в режиме торможения} \end{cases} \quad (6)$$

Сравнительная оценка энергетических показателей работы ПС при алгоритмах управления с ограничениями (4),

(5) и (4), (6) выполнялась на двух участках профиля:

- на реальном участке профиля 1700 м перегона «Белорусская–Динамо» с максимальным значением уклона $i = +3,0\%$ (таблица 3) и минимальным радиусом кривой пути $R = 1475$ м;

- на участке с прямолинейным горизонтальным профилем ($i = 0$ и $R \rightarrow \infty$).

В результате численного моделирования режима движения ПС с ограничениями (4) и (5) на участке профиля с нулевым уклоном – режим AI было получено, что потребляемая мощность на один вагон при разгоне составляет $P_{PI} = 750$ кВт (рис. 2). При достижении скорости 80 км/ч ПС переходит на режим выбега и стабилизации. Для того чтобы на отметке $S = 1700$ м скорость поезда снизилась до нуля, ПС должен перейти в режим торможения при $S = 1420$ м. Для одного вагона на режиме РТ максимум значения мощности, возвращаемой в сеть, составляет $P_{PI} = 800$ кВт. Общие затраты энергии на тягу при работе вагона метро на режиме AI достигают $Q_{PI} = 8,38$ кВт·ч; количество энергии возвращаемой в сеть $Q_{PI} = 3,19$ кВт·ч. Коэффициент возврата вагоном электроэнергии в сеть при рекуперативном торможении на режиме AI составляет $k_{ВОЗ} = 0,616$ (таблица 4).

Если на режимах торможения ток двигателя ограничивать номинальным значением – режим AII, т.е. работать с ограничениями (4) и (6), ПС должен перейти на режим РТ на отметке $S = 1330$ м (рис. 2). При этом максимальное значение рекуперированной мощности составляет $P_{PI} = 540$ кВт/вагон. Общие затраты энергии на тягу достигают $Q_{PI} = 8,35$ кВт·ч/вагон, а рекуперированная энергия – $Q_{PI} = 3,08$ кВт·ч/вагон (таблица 4). Коэффициент возврата

Таблица 4. Сопоставление результатов моделирования с экспериментальными значениями.

Параметр	Ед. изм. технические требования	Значение						
		руководство по эксплуатации	Режим					
			AI	AII	AIII	AIV		
Допустимая скорость движения, VДОП	км/ч	80						
Максимальное ускорение	м/с2	1,3	1,0	0,84	0,84	0,87	0,87	
Максимальное замедление	м/с2	1,3	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	
Время разгона поезда с максимальной загрузкой на горизонтальном участке пути, не более	до 30 км/ч	с	10,0	10,8	10,8	10,8	10,5	10,5
	до 60 км/ч	с	20,0	23,0	23,0	23,0	22,2	22,2
	до 80 км/ч	с	35,0	36,0	35,7	35,7	33,9	33,9
Плавность хода при пуске и служебном торможении, не более	м/с3	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	
Средняя скорость движения по участку 1700 м	км/ч	48,0	–	59,1	58,2	59,6	58,7	
Время хода	с	127,5	–	103,5	105,3	102,8	104,0	
Длина тормозного пути поезда при служебном электрическом торможении со скорости 90 км/ч, не более	м	330	330	370	510	361	486	
Удельный расход электроэнергии на тягу при максимальной нагрузке вагона на перегоне 1700 м, без учета расхода на собственные нужды и возврата электроэнергии в сеть при рекуперации, не более	Вт.ч/т.км	58,0	–	64,53	64,32	63,62	62,67	
Коэффициент возврата электроэнергии в сеть при рекуперативном торможении как отношение энергии, возвращенной вагоном в сеть при рекуперации, к кинетической энергии вагона в момент начала торможения при условии полного приема рекуперированной энергии сетью, kВОЗ	о.е.	0,35	–	0,616	0,595	0,596	0,572	
Энергия, потребляемая на тягу, QП	кВт.ч	–	–	8,38	8,35	8,26	8,14	
Рекуперированная энергия, QР	кВт.ч	–	–	3,19	3,08	3,08	2,96	
Относительная величина рекуперированной энергии, kЭФ	о.е.	–	–	0,38	0,37	0,37	0,36	

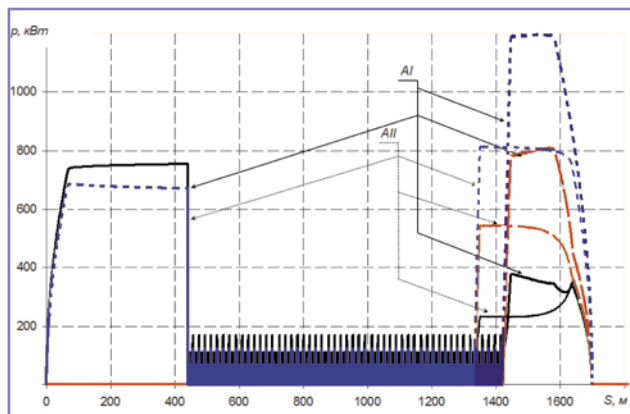


Рис. 2. Результаты моделирования режимов AI и AII.
Изменение мощности вагона метрополитена:
_____ – потребляемая P_R ; ---- – механическая P_M ; –
рекуперированная P_P .

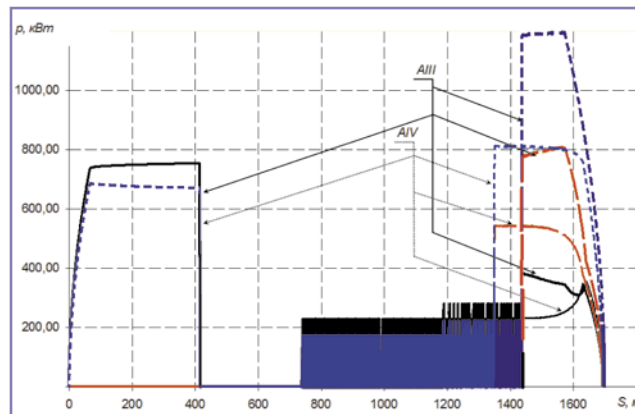


Рис. 3. Результаты моделирования режимов AIII и AIV.
Изменение мощности вагона метрополитена:
_____ – потребляемая P_R ; ---- – механическая P_M ; –
рекуперированная P_P .

энергии в сеть одним вагоном на режиме AII – 0,595.

При моделировании процесса движения ПС по участку реального профиля (таблица 3) с ограничениями (4) и (5) – режим AIII получено, что поезд должен перейти на режим торможения только на отметке $S=1437$ м, т.к. в конце участка имеется подъем (рис. 3). За счет сложного характера профиля часть участка ПС проходит в режиме выбега; это сокращает общие затраты энергии на тягу. Одновременно подъем профиля, где ПС работает в режиме рекуперативного торможения, снижает и значение рекуперированной энергии до 3,08 кВт·ч/вагон. Соответственно, коэффициент возврата энергии на этом режиме уменьшается по сравнению с режимом AI до $k_{\text{воз}} = 0,596$ (таблица 4).

Моделирование движения ПС на участке реального профиля с ограничениями (4) и (6) – режим AIV показал, что тормозной путь должен быть увеличен по сравнению с режимом AIII и начинаться на отметке $S = 1349$ м (рис. 3). При этом рекуперированная энергия достигает 2,96 кВт·ч /вагон, а коэффициент возврата энергии вагоном – $k_{\text{воз}} = 0,572$ (таблица 4).

Таким образом, результаты моделирования показали, что количество затрачиваемой и рекуперированной энергии при движении ПС зависит не только от алгоритма управления тяговым приводом, но и от профиля участка движения. В качестве интегральной характеристики энергетической эффективности работы ПС может

выступать относительная величина рекуперированной энергии

$$k_{\text{эф}} = \frac{Q_R}{Q_P} \quad (7)$$

Из полученных результатов следует, что, если на кратковременных режимах рекуперативного торможения допустить работу энергетического оборудования с токами выше номинального значения, то работа ПС будет более экономичной, чем при ограничении тока номинальным значением (таблица 4).

Литература:

1. Сергеев П.С., Виноградов Н.В., Горянов Ф.А. Проектирование электрических машин. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1970. – 632 с.
2. Копылов И.П. Проектирование электрических машин: учебное пособие для вузов. М.: Энергия, 1980. – 496 с.
3. Электроподвижной состав с асинхронными тяговыми двигателями/ Н.А. Ротанов, А.С. Курбасов, Ю.Г. Быков, В.В. Литовченко; Под ред. Н.А. Ротанова. – М.: Транспорт, 1991. – 336 с.
4. Баранов Л.А., Ерофеев Е.В., Мелешин И.С., Чинь Л.М. Оптимизация управления движением поездов. Учеб. пособие/ под ред. Л.А. Баранова. – М.: МИИТ, 2011. – 164 с.
5. Вагоны метрополитена моделей 81-740.1 и 81-741.1. Руководство по эксплуатации 740.00.00.001 РЭ. – 280 с.
6. Вагоны метрополитена. Технические требования. 2011. – 19 с.

Логина Елена Юрьевна – родилась в 1955 году. Окончила Московский институт инженеров железнодорожного транспорта (МИИТ) по специальности «Локомотивостроение». Доктор технических наук, профессор. В 2000 году защитила докторскую диссертацию по теме: «Совершенствование методов анализа теплового состояния тяговых электродвигателей тепловозов и характеристик их систем охлаждения». Опыт работы – 36 лет. В настоящее время работает профессором МГУПС (МИИТ). Имеет 83 печатных труда и 4 авторских свидетельства.

Коваленко Андрей Викторович – в 2012 году окончил МГУПС (МИИТ) по специальности «Локомотивы». В настоящее время является аспирантом кафедры «Электрическая тяга» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ).

Loginova Elena – was born in 1955. She graduated from Moscow Institute of engineers in railroad transport with specialization in «Locomotive engineering». She is a Doctor of Engineering Science, professor. In 2000 she defended a doctorate thesis on the subject: «Improving of analyzing methods of drive motor thermal state of locomotives and their cooling systems characteristics». Work experience – 36 years. At present she is a professor in MGUPS (MIIT). She has 83 publications and 4 inventor's certificates.

Kovalenko Andrey – In 2012 he graduated from MGUPS (MIIT) with specialization in «Locomotives». At present he is a postgraduate student at the department «Electric traction» in Moscow state railroads university (MIIT).

Пути оптимизации подсистемы управления электрическими аппаратами электроподвижного состава

// Ways of optimization subsystem of electric devices electric rolling stock //

Опарина Е.В.,
ФГБОУ ВПО ПГУПС, г. Санкт-Петербург

В статье предложены два способа оптимизации подсистем управления электрическими аппаратами применением последовательных цифровых интерфейсов, позволяющее уменьшить объем кабельного оборудования, задействовать меньшее число контактов и разъемов. С развитием автоматизации системы управления электроподвижным составом (ЭПС) получили тенденцию к развитию каскадного (подчиненного) управления. Гибкое варьирование аппаратных средств дает возможность организовать вместо имеющихся индивидуальных дискретных сигналов управления электромеханическими аппаратами сеть малой автоматизации на последовательных интерфейсах Ethernet, RS-485, RS-232. Применение оптического волокна в качестве физической среды для передачи сигналов управления позволит обеспечить высокую помехозащищенность линий.
Ключевые слова: система управления, последовательный интерфейс, пассивные оптические сети, экранированная витая пара проводов.

Многоуровневая структура систем управления электроподвижным составом

Первый серийный отечественный электровоз с микропроцессорной системой управления ЭПІ был создан в 1996 году. За прошедший период уровень автоматизации подвижного состава существенно повысился. Можно выделить следующие общие тенденции автоматизации систем управления (СУ) ЭПС:

- распространение блочно-модульных принципов построения систем управления;
- применение идеологии проектирования систем управления с гибким варьированием аппаратных и программных средств;
- развитие методов каскадного (подчиненного) управления, т.е. деление подсистем управления на уровни [1,2].

Если в системе управления электровозов серии ЭПІ ранних выпусков можно выделить два подуровня (уровень реализации режима работы электровоза и уровень исполнительных аппаратов), то на отечественных электровозах более позднего выпуска расширены функции

The article suggests two ways to optimize the control of electrical machines subsystems using serial digital interface that can reduce the amount of cable equipment, use a smaller number of contacts and connectors. With the development of automation control system of EPS have a tendency to develop a cascade (slave) control. Flexible variation of hardware enables to organize the individual instead of the available digital signals control of electromechanical devices on a network of small automated serial interfaces Ethernet, RS-485, RS-232. The use of optical fiber as the physical medium for the transmission of control signals will provide high noise immunity lines.

Keywords: control system, serial interface, passive optical networks, shielded twisted pair wires.

верхнего уровня управления и к двум уже имеющимся добавляется подсистема задания режимов работы электровоза. Таким образом, системы управления ЭПС, как и большинство промышленных сетей управления, имеют трехуровневую структуру построения. На нижнем уровне обеспечивается взаимодействие датчиков и исполнительных механизмов с системой управления. Средний уровень предназначен для контроля режимов, координации работы всех агрегатов и получения информации от каждого из них. Верхний уровень предназначен для определения и задания режимов работы электровоза и для связи с машинистом. Для взаимодействия разных уровней СУ, реализованных в отдельных модулях, применяются локальные промышленные сети управления или так называемые средства малой автоматизации [3]. Данная статья посвящена рассмотрению двух возможных способов оптимизации подсистем управления электрическими аппаратами, относящейся к третьему подуровню управления.

Подсистема управления исполнительными электрическими аппаратами со-

временных электровозов, оснащенных микропроцессорной системой управления, реализована с использованием индивидуальных дискретных сигналов, формируемых в модулях ввода-вывода. Для включения и отключения электрических аппаратов применяются отдельные каналы передачи сигналов управления «как есть». В этом случае приходится применять большее количество разъемов, контактов, задействовать больше кабельного оборудования с лучшими частотными параметрами, чем потребовалось бы для организации интерфейса. Такая ситуация очень характерна при соединении узлов, не имеющих собственных процессоров. Так, например, с целью повышения помехоустойчивости контрольных диагностических цепей электроаппаратов передача информации осуществляется током нагрузки 0,1...0,5 А, что требует увеличения мощности элементов, согласующих уровни входных сигналов.

Одним из путей совершенствования систем автоматического управления электрического подвижного состава является применение последовательных цифровых интерфейсов для передачи управляющих сигналов. Под цифровым интерфейсом понимается система передачи данных между узлами системы или разными системами, описываемая стандартизированным протоколом. Технология последовательных интерфейсов значительно уменьшает количество передающих шин протяженных кабельных линий, а возможность применения оптического волокна в качестве физической среды для передачи сигналов управления позволяет обеспечить высокую помехозащищенность каналов [4].

Сетевые средства систем управления электрическими аппаратами

Современные тенденции развития элементной базы направлены на разработку интерфейсных микросхемных модулей с высокой степенью готовности к применению, для которых не требуются навесные элементы и имеются готовые программы. Это сильный аргумент в пользу применения интерфейса вместо передачи отдельных сигналов. Вместе с тем в настоящее время на рынке предлагается большое количество готовых микросхемных решений для реализации именно последовательных пор-

тов различных интерфейсов, что снижает их стоимость и расширяет область применения. Еще одним достоинством последовательных интерфейсов является уменьшенное использование кабельного оборудования, разъемов, площади печатных плат, чем при использовании параллельных интерфейсов. В настоящее время этот фактор становится важным в связи с ростом плотности информационных потоков на единицу объема (или веса) аппаратуры [5].

Каждому стандартному интерфейсу присуща одна или несколько сред передачи данных. Под средой передачи данных понимается совокупность устройств, проводящих сигналы между портами интерфейса, выбор которой зависит от расстояния между портами интерфейса, топологии, количества линий передачи данных, полосы частот передаваемых сигналов.

Появление в конце XX века волоконно-оптических линий передачи вызвало возникновение ряда стандартов на интерфейсы с волоконно-оптической средой передачи данных, различающиеся по функциям, по применяемым технологиям, по виду источника излучения в передатчике и т.д. Волоконно-оптическая среда имеет все плюсы электрической среды с гальванической развязкой.

Подсистема управления электрическими аппаратами с использованием последовательного интерфейса RS-485

При замене существующей системы управления с параллельным интерфейсом на систему управления с последовательным интерфейсом все электрические аппараты объединяются одним последовательным каналом с микропроцессорной системой управления. По последовательному каналу могут передаваться как дискретные сигналы управления, так и сигналы от контрольных блокировок аппаратов по системе дуплексной или полудуплексной связи.

Последовательный канал характеризуется меньшей скоростью передачи данных, однако в такой высокой скорости, с которой может осуществляться передача данных через современную параллельную шину, зачастую нет необходимости в части обслуживания электромеханических устройств вследствие их большой инерционности. Также существенным недостатком последовательной шины является риск выхода из строя всей системы управления аппаратами в случае, если произойдет ее обрыв. Поэтому, как правило, применяется резервирование канала управления [6].

Для управления электрическими аппаратами при помощи последовательного интерфейса необходимо задействовать микроконтроллер, поддерживающий стандартный промышленный интерфейс, например RS-485. По топологии «шина» надо сделать ответвления к каждой группе аппаратов в зависимости от передаваемых сигналов или расположения обо-

рудования в экипажной части (рис. 1).

Одним из основных требований, предъявляемых к сети малой автоматизации, является помехоустойчивость. На наиболее ответственных линиях передачи управляющих сигналов ЭПС, например, от МСУД к формирователям импульсов ВВП, применяется экранирование проводов [7]. Требованиям помехозащищенности отвечает и используемая для интерфейса RS-485 экранированная витая пара, которая особенно эффективно снижает влияние синфазных помех. При необходимости, в качестве физической среды возможно применение проводов с двойным экраном. Неотъемлемым звеном данной сети, как и любой другой, взаимодействующей с высоковольтным оборудованием, является гальваническая развязка, реализованная на повторителе TCC-120I фирмы MOXA. Повторитель TCC-120I является повторителем интерфейсов RS-422/485 с гальванической развязкой на 2 кВ. Построение всей сети взаимодействия на стандартизированном интерфейсе обеспечивает передачу данных между изделиями разных разработчиков и делает сеть открытой для наращивания оборудования.

Для непосредственного управления конкретными аппаратами применяются модули удаленного ввода/вывода по RS-485 ioLogik R2110 фирмы MOXA. Модули удаленного ввода/вывода имеют до 16 потенциальных входов с максимальным допустимым напряжением +50 В, +110 В. По запросу микроконтроллера модуль ioLogik R2110 передает в локальную промышленную сеть считанные с дискретных входов-выходов данные по интерфейсу RS-485.

Подобные сети малой автоматизации именно с использованием интерфейсов для промышленных линий RS-485

(а также с использованием RS-232, RS-422) широко распространены в системах управления. Они применяются либо в качестве самостоятельных сетей для сбора параметров оборудования, его контроля и сигнализации, для выполнения функций релейной защиты и противоаварийной автоматики, либо при включении в общую автоматизированную систему управления в качестве подсистемы нижнего уровня для управления оборудованием и передачи информации о текущих электрических параметрах.

Применение волоконно-оптических линий в системах управления ЭПС

Волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) также являются стандартизованными цифровыми интерфейсами. Для их реализации на рынке в достаточно большом объеме предлагается элементная база с высокой степенью готовности к применению. Существенным преимуществом ВОЛС является почти полная невосприимчивость к электромагнитным помехам. Неметаллическая природа среды передачи данных обеспечивает гальваническую развязку между СУ и силовой цепью. Пропускные способности стандартизованных ВОЛС лежат выше пропускных способностей цифровых интерфейсов с электрической природой сигналов. Главным недостатком ВОЛС является высокая стоимость кабельного и приемопередающего оборудования [5].

Применение оптических линий связи реализовано на опытных электровозах ЭП10. Здесь для повышения помехозащищенности оптические линии соединяют разнесенные по кузовному пространству микропроцессорные модули управ-

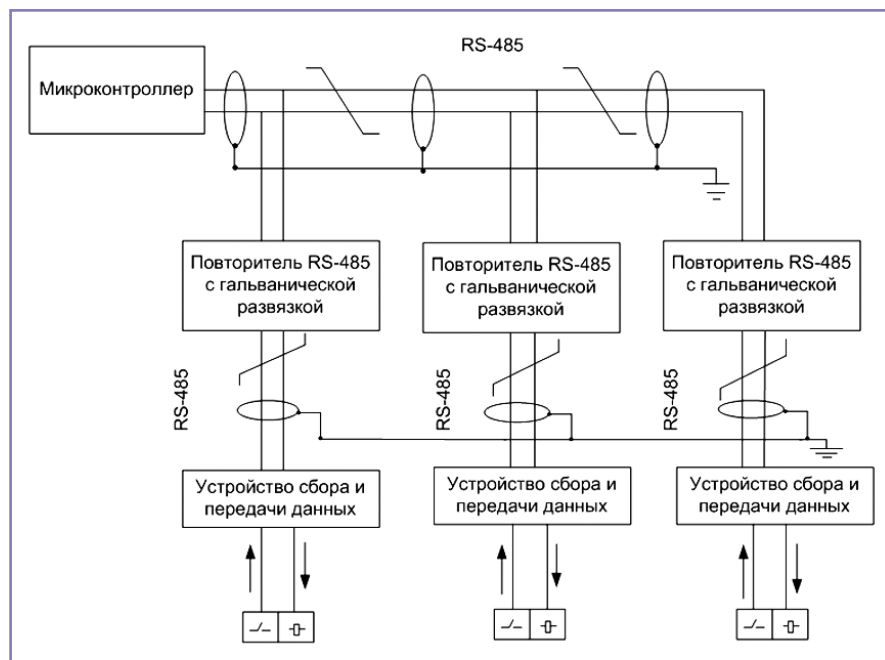


Рис. 1. Реализация подсистемы управления электрическими аппаратами с использованием интерфейса RS-485.

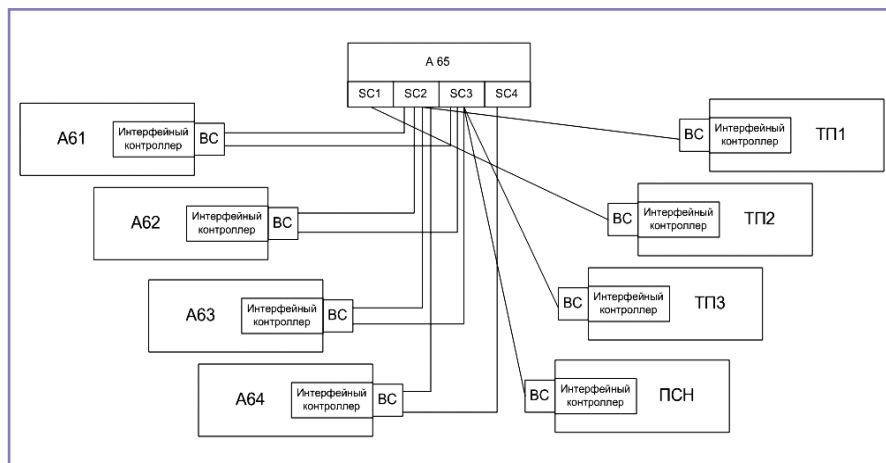


Рис. 2. Структура оптоволоконных интерфейсных соединений системы управления ЭП10.

ления локомотивом подсистемы верхнего уровня, а также модули подсистемы управления тяговыми преобразователями, относящейся к среднему уровню управления. Обмен информацией по оптическому кабелю осуществляется при помощи интерфейса MVB (*Multifunctional Vehicle Bus*). Интерфейс связи MVB разработан специально для использования на тяговом подвижном составе и в конце 1990-х годов был введен в международный стандарт IEC-61375. Реализация данного интерфейса возможна с помощью электрических соединений, как это сделано внутри микропроцессорных модулей управления, а также на основе волоконно-оптической линии. В этом случае линия связи представляет собой пару оптических жил. Одна жила играет роль прямого канала передачи, а другая – обратного (рис. 2). Все используемые в системе управления электровоза ЭП10 элементы непосредственно имеют только электрические разъемы для подключения интерфейса MVB. Подключение оптоволоконных кабелей к устройствам выполняют с помощью дополнительных компактных устройств интерфейсных адаптеров BC (*Bus Coupler*). Помимо адаптеров системный интерфейс связи реализуется посредством интерфейсных разветвителей – концентраторов оптоволоконных интерфейсных соединений SC (*Star Coupler*) и интерфейсных контроллеров с электрическими вводами-выводами, установленными во всех элементах системы управления для соединения в единую систему.

Агрегатно интерфейс связи MVB является последовательным интерфейсом, по электрическим параметрам идентичным интерфейсу RS-485 (*Recommended Standard-485*). Скорость передачи данных составляет 1,5 Мбит/с. Соединение оптоволоконных кабелей интерфейса MVB технически не может быть выполнено параллельно. В связи с этим все оптоволоконные интерфейсные соединения модулей и подсистем в единую сеть выполнены в виде «звезды», центром

которой являются четыре интерфейсных разветвителя SC, расположенные в блоке основного администратора системного интерфейса связи MVB (A 65) [8].

Организация симплексной (односторонней) связи по каждой жиле недостаточно использует резерв оптоволоконной среды, но удешевляет оборудование сопряжения модулей (SC-концентраторы и BC-адаптеры) с оптической средой. Рассмотренный интерфейс MVB служит для

обмена информацией между модулями подсистем верхних уровней управления, имеющими в своем составе ведущие микроконтроллеры.

Применение технологии пассивных оптических сетей в подсистемах третьего подуровня управления ЭПС

Для организации управления исполнительными электрическими аппаратами на подвижном составе при помощи ВОЛС с целью оптимизации кабельного оборудования возможно применение технологии пассивных оптических сетей. Пассивные оптические сети (*PON-Passive Optical Network*) – это наиболее перспективные технологии будущего, позволяющие строить сети с минимальным количеством оптических линий и активных узлов и с максимальным потенциалом возможностей.

Основные принципы построения архитектуры пассивных электрических сетей (PON) (рис. 3):

- использование всего одного приемопередатчика (*OLT-Optical Line Termination*);
- оптическая распределительная сеть построена на основе одного волокна с использованием оптических разветвителей (сплиттеров) C1-Ci;

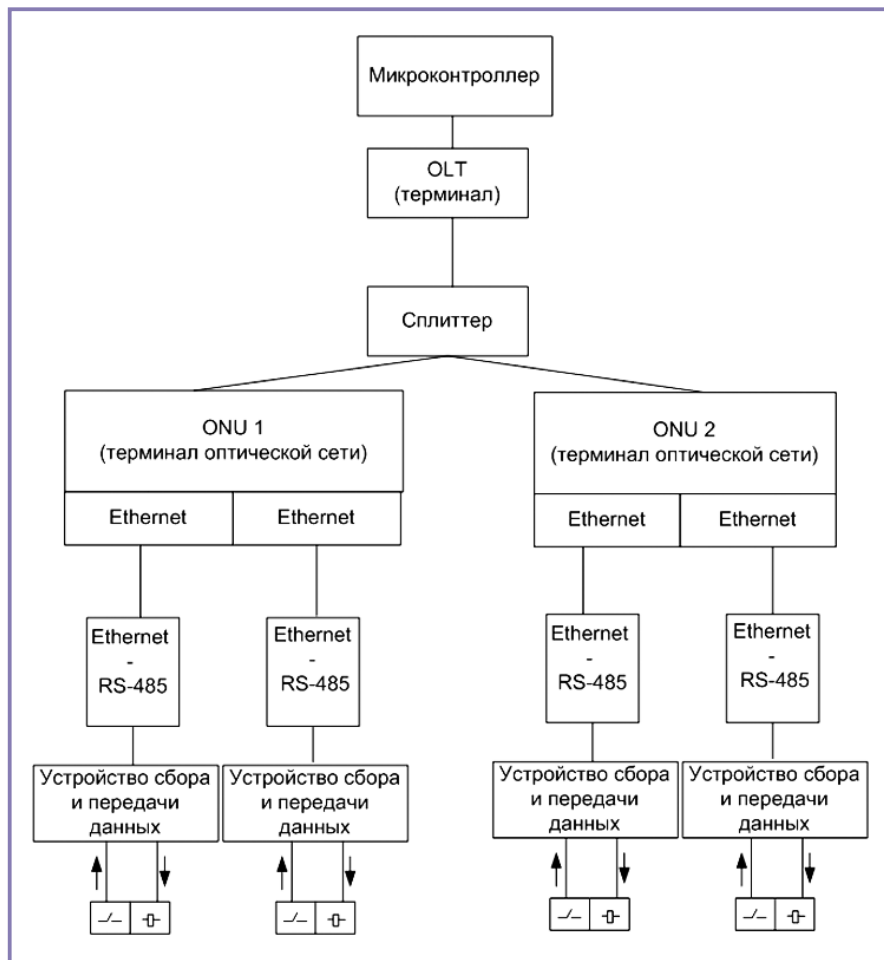


Рис.3. Структура сети PON.

- направления передачи и виды трафика разделяются по длинам волн или по мощностям;

- от приемопередатчика к терминалам оптической сети (*ONU – Optical Network Unit*) передаются последовательности кадров Ethernet, адресованных соответствующим терминалам. Каждый терминал выбирает свои кадры на основании анализа их адресных заголовков;

- в направлении от терминалов к приемопередатчику осуществляется бесконфликтный доступ к моноканалу, исключающий возможность «столкновений», т.е. одновременной передачи протокольных единиц более чем одним передатчиком, для чего применяется принцип множественного доступа с временным разделением каналов (*TDMA – Time Division Multiplexing*).

Из ряда стандартов пассивных оптических сетей, разработанных к настоящему времени, можно выделить стандарт *EPON*, реализующий архитектуру, максимально приближенную к стандартам *Ethernet*. В стандарте предусмотрено применение трех длин волн: 1490 нм для прямого потока, 1310 нм – для обратного потока, окно 1550 нм резервируется [9].

Главным достоинством стандарта *EPON* считается то, что в качестве протокольных единиц выбраны кадры *Ethernet*, обранные специальными заголовками. Данное преимущество обеспечивает очень простую совместимость оборудования *EPON* с другими сетевыми устройствами стандарта *Ethernet*, а значит и существенное упрощение оборудования сетевых узлов.

Для преобразования сигнала управления из *Ethernet* в протокол физического уровня применяются стандартные переходники или последовательные шлюзы *Ethernet – RS 485 (RS-232)* таких производителей, как *MOXA, Advantech Equipment*. Для непосредственного управления конкретными аппаратами также необходимо применяются модули удаленного ввода/вывода по *RS-485 ioLogic R2110* фирмы *MOXA*.

Выводы

В статье рассмотрены варианты построения сетей малой автоматизации для управления электрическими аппаратами ЭПС, отличающиеся средой передачи данных и уровнем применяемых интерфейсов по модели *OSI*. Общими положительными свойствами обеих сетей автоматизации являются следующие:

- обеспечение гальванической развязки между всеми управляемыми электрическими аппаратами и цифровой СУ: в первом случае для сети, реализованной на экранированной витой паре – с помощью повторителя *RS-485*, во втором случае – посредством самой среды передачи данных – волоконно-оптической линии;

- реализация систем передачи данных на последовательных интерфейсах уменьшает использование кабельного оборудования, разъемов, площади печатных плат. В настоящее время этот фактор стал очень важен в связи с ростом плотности информационных потоков на единицу объема (или веса) аппаратуры, а применение стандартизированных интерфейсов *RS-485* и *Ethernet* позволяет сочетать оборудование различных производителей;

- сеть малой автоматизации, реализованная на витой паре, является менее затратной в части ее организации и установки на ЭПС; сеть, основанная на волоконно-оптической линии связи, по характеристикам передачи данных гораздо выше первой, но для своей реализации требует весомых капиталовложений и более высокой квалификации обслуживающего персонала.

Литература:

1. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: учебник для студ. высш. учеб. Заведений / Белов М.П., Новиков В.А., Рассудов Л.Н. – 3-е изд., испр. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 576 с.
2. Применение цифровых систем управления на электрическом подвижном составе./ Евста-

фьев А.М.// Транспорт: наука, техника и управление. ВИНТИ РАН – М. №10. – 2010. С. 10-13.

3. Системы малой автоматизации / Николайчук О.И. – М.: СОЛОН-Пресс, 2003. – 256 с.

4. Исследование передачи импульсных сигналов управления силовыми электронными преобразователями по мультиплексным каналам / Якушев А.Я., Сирая (Опарина) Е.В. // Материалы шестого международного симпозиума «Элтранс-2011». ПГУПС, 2011. С. 47-54.

5. Интерфейсы. Выбор и реализация. / Лапин А.А. – Москва: Техносфера, 2005. – 168 с.

6. Оптимизация системы управления электрическими аппаратами на магистральных электропроводах ЭП1 и ЭП2К. / Якушев А.Я., Опарина Е.В. // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. – № 3(36). – 2013 г. С. 25-29.

7. Система управления и диагностики электроваз ЭП 10. / С.В. Волконовский, М.И. Корешков, С.В. Покровский и др.; Под ред. С.В. Покровского. – М.: Интекст, 2009. – 356 с.

8. Оптические интерфейсы цифровых коммуникационных станций и сети доступа / Никульский И.Е. – М.: Техносфера, 2006. – 256 с.

9. Аппаратура микропроцессорной системы управления и диагностики электроваз./ Бадьян И.Н.// Современные технологии автоматизации – М. – № 4. – 2000. С. 48-52.

Опарина Екатерина Владимировна – родилась в 1988 году. В 2012 окончила Петербургский государственный университет путей сообщения по специальности «Электрический транспорт железных дорог». Опыт работы – 5 лет. В настоящее время работает электромехаником ЭЧ-4 Октябрьской железной дороги. Имеет 6 научных трудов.

Oparina Yekaterina – was born in 1988. In 2012 she graduated from Petersburg state university of communications with a specialization in 190303 «Railway electrical transport». She has 5 years of experience. At present she works as electromechanics АСН-4 of Oktyabrskaya railway. She has 6 scientific works.

Применение метода конечных разностей для определения распределения температуры в изоляции тяговых электрических машин

// Final differences method application for calculation of temperature distribution in traction motors isolation //

Дорохина Е.С., Рапопорт О.Л., к.т.н.,
Хорошко А.А.,
Томский политехнический институт, г. Томск

Рассматривается возможность применения метода конечных разностей для определения распределения температуры в изоляции тяговых электрических машин, основанного на замене производных в дифференциальном уравнении их приближенным значением, что позволяет уйти от громоздких расчетов и получить достаточно точную картину теплового поля. Использование данного метода послужит основой для определения остаточного ресурса изоляции двигателя. Ключевые слова: метод конечных разностей, тяговый электродвигатель, распределение температуры, изоляция.

In article final differences method application is considered for calculation of temperature distribution in traction motors isolation. This method is based on replacement of derivatives in the differential equation by their approximate value that allows to leave from unwieldy calculations and to receive rather exact picture of a thermal field. The method will form a basis for traction motors isolation residual resource calculation.

Keywords: final differences method, traction motors, temperature distribution, isolation.

В настоящее время в условиях высокой грузонапряженности российских железных дорог определяющее значение имеет обеспечение надежной и безотказной работы электровозов и электропоездов, а также повышение их технико-экономических показателей. Эффективная и надежная работа электровозов во многом зависит от надежности тяговых электродвигателей (ТЭД). Как известно, работа любой электрической машины сопровождается потерями энергии, а применительно к тяговым электродвигателям эти потери играют важную роль в определении общей картины теплового состояния ТЭД при эксплуатации. В результате возникающих электрических потерь происходит перераспределение энергии и выделение её в виде тепла, которое нагревает отдельные узлы машины, повышая их температуру. Проведенные исследования показывают, что наиболее нагретыми частями двигателя при эксплуатации являются обмотки. Неоднократное превышение допустимой температуры обмоток приводит к ускоренному старению электроизоляционных материалов, что в последующем становится причиной пробоя изоляции и преждевременного выхода из строя ТЭД. Анализ отказов оборудования локомотивов показывает, что основные виды повреждений ТЭД как постоянного, так и переменного тока являются: пробой изоляции и межвитковые замыкания обмоток якоря, машин постоянного тока и статора машин переменного тока (16-25%), пробой изоляции и межвитковые замыкания главных и

дополнительных полюсов и компенсационной обмотки (12-16%).

Для недопущения наступления такого предельного состояния ТЭД в процессе эксплуатации наиболее важной и перспективной для решения задач является получение информации о картине распределения температуры в изоляции между элементами конструкции ТЭД.

Решение данной задачи возможно с использованием метода конечных разностей [1].

Учитывая, что в тяговом электродвигателе передача тепла осуществляется посредством теплопроводности, то нестационарный перенос тепла теплопроводностью можно описать уравнением Фурье – Киргофа, записанным в декартовой системе координат

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q(x, y, z, t, T) \quad (1)$$

Это уравнение устанавливает связь между временным и пространственным изменением температуры в любой точке тела. С помощью данного уравнения можно описать множество вариантов развития процесса кондуктивного теплопереноса. Но для того, чтобы наиболее полно математически описать хотя бы один вариант, к соотношению (1) необходимо добавить условия однозначности, которые содержат геометрические, физические, начальные и граничные условия.

Метод конечных разностей основан на замене производных в дифференциальном уравнении их приближенным значением, выраженным через разности значений функции в отдельных дискретных точках – узлах сетки. Это позволяет уйти от громоздких расчетов. Аппроксимируя частные производные дифференциального уравнения (1) конечными разностями, получаем систему линейных алгебраических уравнений для определения температуры как локальной характеристики в каждом узле сетки. Полученная система является незамкнутой, для её замыкания используют разностное представление граничных условий. В результате получается замкнутая система линейных алгебраических уравнений, которая решается численными методами [1].

Таким образом, используя данный метод, можно получить картину распределения температуры через изоляцию между элементами конструкции ТЭД.

При этом делаем допущение, что сердечники статора ТЭД переменного тока, главные и добавочные полюса, сердечник якоря машин постоянного тока, а также все обмотки машин являются равномерно распределенными источниками тепла, следовательно, температура на границе с изоляционным материалом является температурой элемента конструкции. Зная температуру на границах изоляционных материалов, начальную температуру окружающей среды и все свойства применяемых материалов, можно получить кривую распределения температуры в изоляции между элементами конструкции.

Процесс теплопереноса, используя метод конечных разностей [2] изоляционной среды между сталью сердечника и обмоткой, можно представить как совокупность двух или более пластин, выполненных из изоляционных материалов

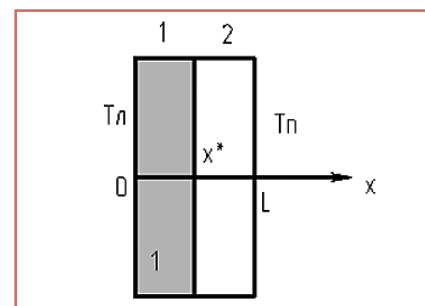


Рис. 1. Геометрия задачи.

с различными теплофизическими свойствами, как показано на рис. 1.

В этом случае математическая постановка задачи теплопереноса будет иметь вид

$$\begin{cases} \rho_1 c_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2}, 0 < x < x^*, \\ \rho_2 c_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2}, x^* < x < L; \end{cases} \quad (2)$$

где индекс 1 соответствует левой пластине (материал 1), а индекс 2 соответствует пластине правой (материал 2).

Начальные граничные условия определим следующим образом

$$t = 0: T = T_o, 0 \leq x \leq L;$$

$$x = 0: T = T_n, t > 0;$$

$$x = L: T = T_n, t > 0;$$

$$\begin{cases} T_1(t, x^*) = T_2(t, x^*); \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=x^*} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=x^*} \end{cases} \quad (3)$$

где ρ – плотность изоляционного материала; c – теплоемкость материала; λ – коэффициент теплопроводности изоляционного материала; T_n – температура на границе со сталью сердечника; T_o – температура на границе с обмоткой; T_o – начальная температура; x – координата поперек толщины изоляции; L – толщина всех слоев изоляции.

Решение данной задачи проводится численно на основе неявной разностной схемы, алгоритм решения которой представлен в [2].

Для асинхронных тяговых двигателей в процессе эксплуатации важным является распределение температуры в изоляции между сталью сердечника статора и обмоткой статора в пазу. Температурное поле изоляции для двигателя НТА-1200 представлено на рис. 2. Изоляционные материалы между сталью сердечника статора и обмоткой статора: материал 1 – стеклослюдинитовая лента, со следующими свойствами: $\lambda_1 = 0,12 \text{ Вт/(м}^\circ\text{С)}$, $\rho_1 = 815 \text{ кг/м}^3$, $c_1 = 1300 \text{ Дж/(кг}^\circ\text{С)}$; материал 2 – лента ЛЭС ($\lambda_2 = 0,17 \text{ Вт/(м}^\circ\text{С)}$, $\rho_2 = 1500 \text{ кг/м}^3$, $c_2 = 1600 \text{ Дж/(кг}^\circ\text{С)}$). На границе со сталью сердечника статора $\theta_n = 93,4^\circ\text{С}$, на границе с обмоткой статора $\theta_o = 149,9^\circ\text{С}$, начальная температура $\theta_o = 25^\circ\text{С}$.

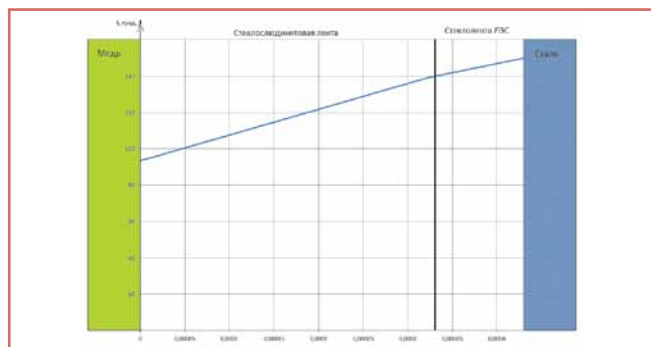


Рис. 2. Распределение температуры в изоляции пазовой части обмотки статора двигателя НТА-1200.

Картина распределения температуры между сталью и обмоткой главного полюса для тягового двигателя постоянного тока на примере ТЛ-2К1 представлена на рис. 3. Изоляция обмотки главного полюса выполнена из следующих материалов: материал 1 – асбестовая бумага со следующими свойствами $\lambda_1 = 0,19 \text{ Вт/(м}^\circ\text{С)}$, $\rho_1 = 770 \text{ кг/м}^3$, $c_1 = 815 \text{ Дж/(кг}^\circ\text{С)}$; материал 2 – стеклослюдинитовая лента: ($\lambda_2 = 0,12 \text{ Вт/(м}^\circ\text{С)}$, $\rho_2 = 815 \text{ кг/м}^3$, $c_2 = 1300 \text{ Дж/(кг}^\circ\text{С)}$) 3 – лента ЛЭС ($\lambda_3 = 0,17 \text{ Вт/(м}^\circ\text{С)}$, $\rho_3 = 1500 \text{ кг/м}^3$, $c_3 = 1600 \text{ Дж/(кг}^\circ\text{С)}$); материал. На границе со сталью главного полюса $\theta_n = 90^\circ\text{С}$, на границе с обмоткой полюса $\theta_o = 104^\circ\text{С}$, начальная температура $\theta_n = 20^\circ\text{С}$.

Аналогичная картина температурного поля наблюдается также между обмоткой и сталью добавочного полюса, обмоткой в пазу и сталью якоря тягового двигателя постоянного тока ТЛ-2К.

Данные кривые были рассчитаны через 10, 30, 60 секунд. Расчеты показали, что все распределения температуры по толщине изоляции проходят по одной характеристике. Из чего можно сделать вывод, что это является следствием достаточно высоких температур и малой толщины изоляции.

Кривая имеет линейный характер, рост температуры происходит плавно без значительных скачков, т.е. температура внутри изоляционных слоев паза не превышает граничные температуры. Это дает возможность судить о величине температуры как по температуре обмотки машины, так и по температуре сердечника. Особенно актуальным это является для стальных сердечников статора асинхронного двигателя и якоря машины постоянного тока, в случаях ухудшенного охлаждения.

Данные расчеты могут служить основой для определения остаточного ресурса изоляции двигателя и позволяют легко перейти к практической реализации прогнозирования ресурса ТЭД по тепловому состоянию.

Литература:

1. Лыков А.В. Теория теплопроводности: учебное пособие для вузов / А.В. Лыков. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.: ил.
2. Кузнецов Г.В. Разностные методы решения задач теплопроводности: учебное пособие / Г.В. Кузнецов, М.А. Шеремет; Томский политех-

нический университет (ТПУ). – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 173 с.: ил.

Дорохина Екатерина Сергеевна – родилась в 1986 году. В 2009 году окончила Томский политехнический университет по направлению «Электротехника, электромеханика и электро-технологии». Опыт работы – 4 года. В настоящее время работает ассистентом кафедры ЭКМ Энергетического института Томского политехнического университета. Имеет 1 печатный труд.

Рапопорт Олег Лазаревич – родился в 1946 году. В 1969 году окончил Томский политехнический институт по специальности «Электрические машины и аппараты». Кандидат технических наук, доцент. В 1974 году защитил диссертацию по теме: «Прогнозирование технического состояния асинхронных двигателей». Опыт работы – 42 года. В настоящее время работает доцентом кафедры ЭКМ Томского политехнического университета. Имеет 140 научных работ, включая монографию, 22 патента.

Хорошко Анастасия Александровна – родилась в 1986 году. В 2009 году окончила Томский политехнический университет по направлению «Электротехника, электромеханика и электро-технологии». Опыт работы – 4 года. В настоящее время работает ассистентом кафедры ЭКМ Энергетического института Томского политехнического университета. Имеет 1 печатный труд.

Dorokhina Yekaterina – was born in 1986. In 2009 she graduated from Tomskiy polytechnic university with a specialization in «Electric engineering, electromechanics, electrotechnics». She has 4 years of work experience. At present she works as teaching assistant at the department EKM of the Power engineering university of Tomskiy polytechnic university. She has one publication.

Rapoport Oleg – was born in 1946. In 1969 he graduated from Tomskiy polytechnic institute with a specialization in «Electrical machines and devices». He is a Candidate of Sciences, assistant professor. In 1974 he defended a thesis on: «Forecasting of technical condition of asynchronous motors». He has 42 years of work experience. At present he works as assistant professor at the department EKM of Tomskiy polytechnic university. He has 140 scientific works, including monography and 22 patents.

Khoroshko Anastasiya – was born in 1986. In 2009 she graduated from Tomskiy polytechnic university with a specialization in «Electric engineering, electromechanics, electrotechnics». She has 4 years of work experience. At present she works as teaching assistant at the department EKM of the Power engineering university of Tomskiy polytechnic university. She has one publication.

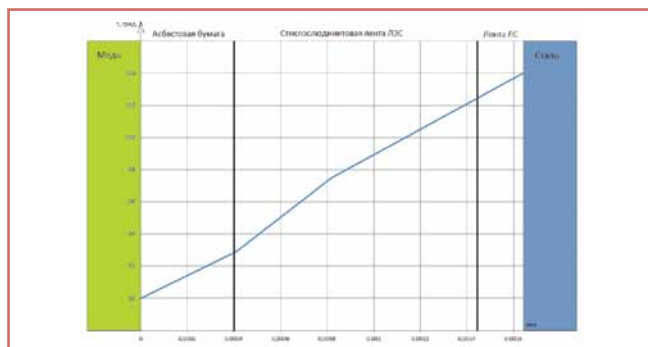


Рис. 3. Распределение температуры в изоляции обмотки главного полюса двигателя ТЛ-2К.

Компьютерное моделирование электропривода транспортного модуля с линейным асинхронным двигателем

// Computer modeling of transport module electric drive, equipped by linear induction motor //

Епифанов Г.А.,
АО «Сименс АГ», г. Санкт-Петербург

Мазнев А.С., д.т.н., профессор,
Петербургский Государственный Университет путей сообщения,
г. Санкт-Петербург

В условиях депо перспективным представляется использование низкоскоростных транспортных модулей с линейным асинхронным электроприводом (ЛЭП) для перемещения и позиционирования подвижного состава. В статье представлена компьютерная модель и результаты моделирования линейного асинхронного электропривода по системе «преобразователь напряжения и частоты – линейный асинхронный двигатель» в среде Simulink Matlab.

Ключевые слова: линейный асинхронный двигатель, линейный асинхронный электропривод, энергоэффективность, компьютерное моделирование.

In a depot it seems that using of low-speed transport modules with linear asynchronous drive is perspective for railcar moving and positioning. The article deals with Simulink Matlab computer model and modeling results of linear asynchronous drive «frequency converter – linear induction motor».

Keywords: linear induction motor, linear asynchronous drive, power efficiency, computer modeling.

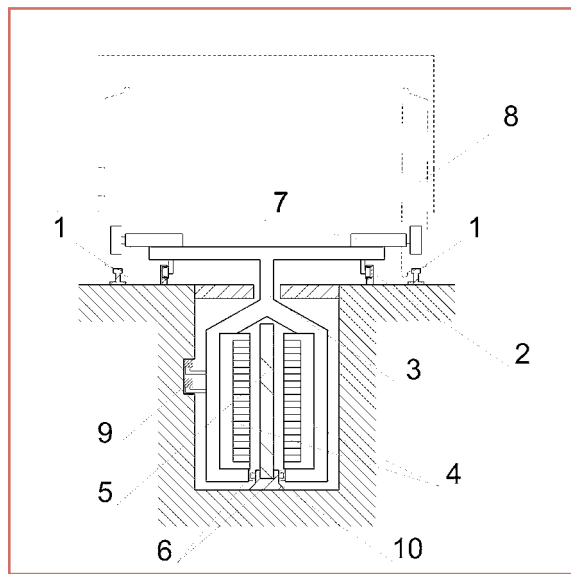


Рис. 1. Компоновочная схема транспортного модуля с ЛАД:

- 1 – рельсовая колея;
- 2 – вспомогательная рельсовая колея;
- 3 – несущая рама; 4 – индукторы;
- 5 – шлицованная реактивная шина;
- 6 – система стабилизации зазора;
- 7 – система зацепа за экипажную часть подвижного состава;
- 8 – колесная пара буксируемого подвижного состава;
- 9 – токопроводящие троллеи.

шины позволяют реализовать наилучшие удельные показатели по силе и энергоэффективности [3].

В [2] показано, что к ЛАД рассматриваемой конструкции может быть с достаточной степенью точности применена Т-образная схема замещения вращающегося асинхронного двигателя (рис. 2). Параметры обмотки индуктора (R_1 и $X_{\sigma 1}$), индуктивное сопротивление намагничивающего контура X_m , активное сопротивление шлицованной реактивной шины R'_2 рассчитываются по методике, предложенной в [4], [5], величиной $X'_{\sigma 2}$ можно пренебречь из-за отсутствия магнитопровода вторичной структуры. При низких частотах ($f_1 \approx 5-7$ Гц) потери в стали незначительны, поэтому можно принять $R_m \approx 0$. Проверкой расчетов служит расчет по методике, базирующейся на рассмотрении трехмерного электромагнитного поля в зазоре и реактивной шине [2], [3], реализованной в компьютерной программе «Linear Induction Motor».

В [1] и [2] рассмотрены возможности использования тягового модуля с ЛАД для перемещения электропоезда типа ЭР2 составностью 10 вагонов и массой $m = 480$ т на длину поезда $l = 201$ м.

В соответствии с методикой, изложенной в [6], в [2] определены силы сопротивления движению при трогании с места, разгоне, движении с установившейся скоростью, торможении. При заданных значениях ускорения a_p и замедления a_m определены основные показатели технологического цикла (таблица 1): время разгона t_p , установившегося движения t_y и торможения t_m , требуемые усилия при разгоне F_p , установившемся движении F_y и торможении F_m для случаев разгона до скоро-

В [1] и [2] рассмотрен тяговый транспортный модуль для перемещения и позиционирования подвижного состава в условиях ремонтного депо, приведены методика и результаты расчета характеристик двухстороннего линейного асинхронного двигателя (ДЛАД), расположенного внутри рельсовой колеи. Компонировочная схема модуля представлена на рис. 1. Двухстороннее исполнение индуктора в сочетании со шлицованной реактивной

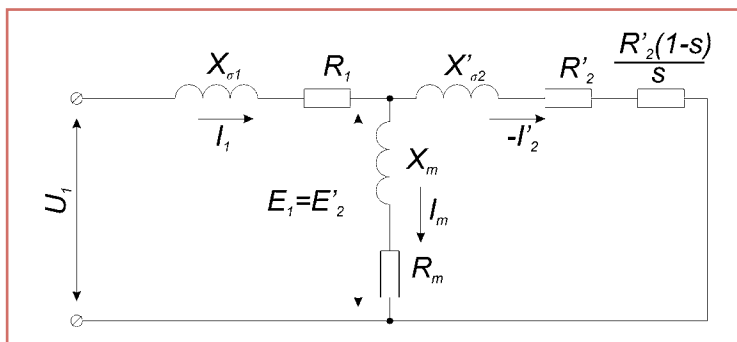


Рис. 2. Т-образная схема замещения асинхронной машины.

Таблица 1. Характеристики технологического цикла электропривода.

Скорость, км/ч	$a_p, \text{м/с}^2$	$a_m, \text{м/с}^2$	$F_p, \text{кН}$	$t_p, \text{с}$	$F_m, \text{кН}$	$t_m, \text{с}$	$F_y, \text{кН}$	$t_y, \text{с}$	$t_{\text{ц}}, \text{с}$
5	0,02	0,04	16,5	69	14,0	35	6,3	93	197
	0,04	0,06	26,7	35	24,2	23	6,3	116	174
	0,06	0,08	36,9	23	34,4	17	6,3	124	165
	0,08	0,1	47,0	17	44,5	14	6,3	129	160
	0,1	0,12	57,2	14	54,7	12	6,3	132	157
4	0,02	0,04	16,5	56	14,0	28	6,3	139	223
	0,04	0,06	26,7	28	24,2	19	6,3	158	204
	0,06	0,08	36,9	19	34,4	14	6,3	165	197
	0,08	0,1	47,0	14	44,5	11	6,3	168	193
	0,1	0,12	57,2	11	54,7	9	6,3	171	191

Таблица 2. Параметры ЛАД транспортного модуля.

Конструктивные параметры машины	
Исполнение индуктора	двухстороннее
Активная длина индуктора $L_s = 2pt$, мм	1500
Ширина индуктора $2c$, мм	205
Число полюсов $2p$	6
Полюсное деление τ , мм	250
Односторонний воздушный зазор δ , мм	3
Масса меди индуктора, кг	43
Масса стали индуктора, кг	375
Толщина реактивной шины d , мм	5
Материал реактивной шины	алюминий
Удельная электрическая проводимость материала шины γ_2 , См/м при температуре $\Theta_p = 115^\circ\text{C}$ [ГОСТ 25941-83]	26480000
Параметры схемы замещения	
Активное сопротивление фазы первичной обмотки R_p , Ом	0,215
Индуктивность рассеяния первичной обмотки $L_{\sigma 1}$, Гн	0,0019
Индуктивность намагничивающего контура L_m , Гн	0,03
Приведенное активное сопротивление вторичной структуры R_2' , Ом	0,564
Параметры номинального режима	
Ток статора I_p , А	111
Действующее значения фазного напряжения U_p , В	115
Частота питающего напряжения f_p , Гц	6
Относительное скольжение s	0,4
Скорость движения v , м/с	1,8
Сила тяги F_x , кН	6,96
Механическая мощность P_m , кВт	12,5
Коэффициент полезного действия $\eta/\eta_{\text{эм}}$	0,43/0,6
Коэффициент мощности $\cos\varphi/\cos\varphi_{\text{сп}}$	0,75/0,7

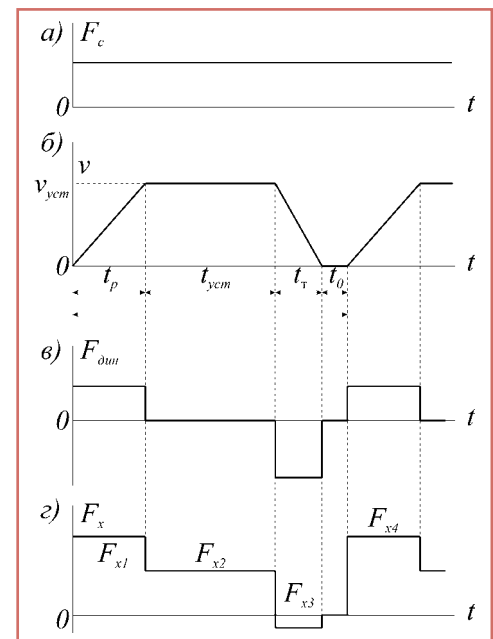


Рис. 3. Диаграмма технологического цикла подачи состава на позицию:
а – сила сопротивления движению F_c ;
б – мгновенная скорость движения v ;
в – динамическая составляющая $F_{\text{дин}}$;
г – сила тяги ЛАД F_x .

стей $v = v_{\text{ном}} = 5 \text{ км/ч} = 1,4 \text{ м/с}$ и $v = 4 \text{ км/ч} = 1,1 \text{ м/с}$. На рис. 3 представлена диаграмма цикла.

Проведенные расчетно-теоретические исследования тягово-энергетических показателей позволили определить наиболее рациональные значения параметров ЛАД, представленные в таблице 2.

Рассматриваемый электропривод по системе ПЧ-ЛАД [7] предполагается выполнить (рис. 4) с использованием регулятора скорости. Моделирование системы частотно-управляемого асинхронного электропривода выполнено в среде Simulink Matlab 7.10.0 [8]. В компьютерных моделях реализованы принцип частотно-токового управления (DCC-система) [9] и принцип векторного прямого управления моментом (DSC-система) [10].

Общий вид компьютерной модели DCC-системы представлен на рис. 5.

В компьютерных моделях рассмотрен технологический цикл модуля в соответствии с данными таблицы 1 и рис. 3. При решении системы

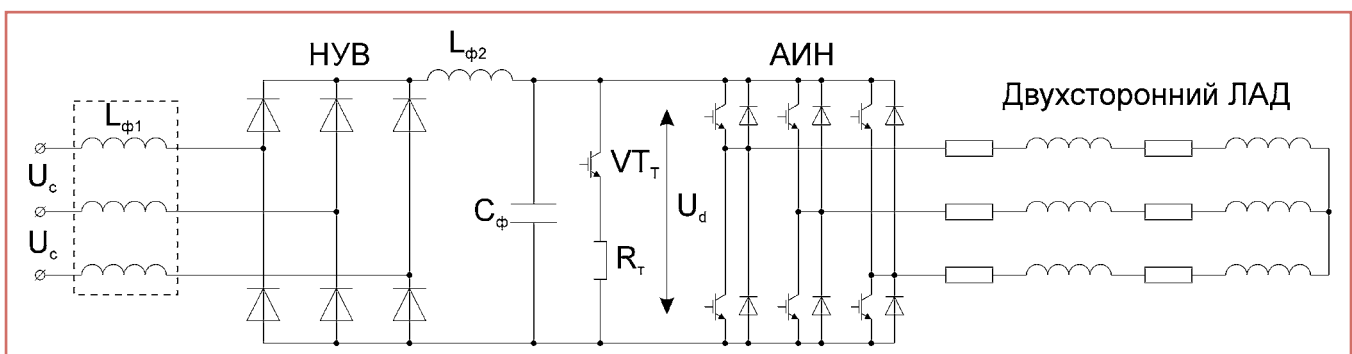


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема тягового привода.

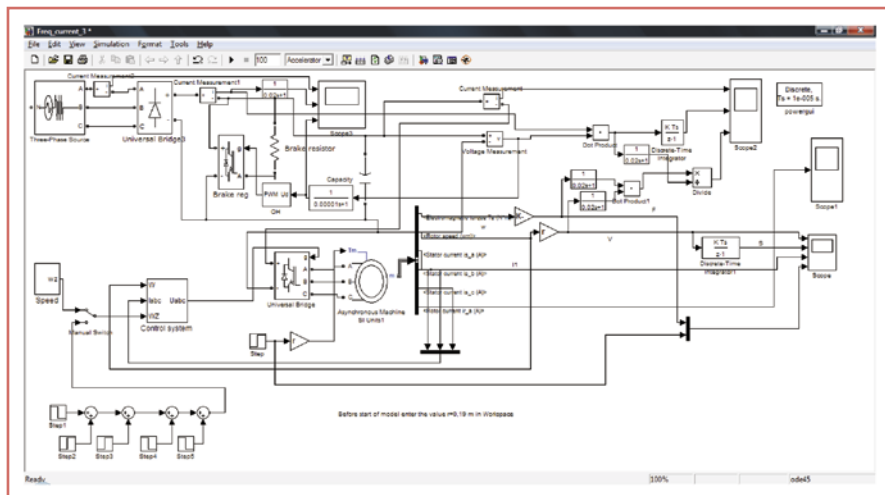


Рис. 5. Компьютерная модель линейного асинхронного привода тягового модуля.

дифференциальных уравнений в моделях использовался метод Рунге-Кутты третьего порядка (ode3) с фиксированным шагом интегрирования [11]. Для ускорения расчетов была применена дискретизация модели.

В процессе моделирования решались следующие задачи:

- определение расхода электроэнергии при пуске, установившемся движении и торможении в зависимости от времени разгона и установившейся скорости движения;
- исследование характеристик электропривода в режиме электродинамического торможения, при высоких скольжениях и в зоне сверхнизких скоростей (< 1 м/с);
- исследование характеристик электропривода при реализации режимов усиления поля в зазоре и дискретного питания.

Большой воздушный δ и немагнитный Δ зазоры ($\delta \geq 3$ мм, $\Delta = 2\delta + d \geq 11$ мм) и, как следствие, достаточно низкая индукция в зазоре (амплитуда нормальной составляющей в зазоре $B_{\delta y} \approx 0,62$ Тл, магнитопровод ЛАД ненасыщен) в номинальном режиме позволяют использовать режим усиления поля при сохранении линейности системы. При максимально допустимом значении индукции в зубце индуктора по условиям насыщения $B_{\delta y} \approx 2 \cdot B_{\delta y} \approx 1,8$ Тл [5] индукция в зазоре может быть увеличена до $B_{\delta y} = (0,8 \div 0,9)$ Тл, то есть на 40÷50%.

Сила тяги [5] при известных параметрах Т-образной схемы замещения и пренебрежимо малом X'_{o2} определяется как

$$F_x = \frac{2\pi \cdot 3 \cdot p \cdot L_m \cdot I_m \cdot I_2'}{L_s} \quad (1)$$

где p – число пар полюсов;

L_m – индуктивность намагничивающего контура;

I_m – намагничивающий ток;

I_2' – приведенный ток вторичной структуры;

L_s – активная длина индуктора ЛАД.

При заданном значении F_x электро-

привод будет работать при меньшем значении вторичного тока I_2' и, как следствие, меньших абсолютном β и относительном s скольжениях, что позволит уменьшить потери в реактивной шине, а в режиме разгона – увеличить ускорение a_p и сократить t_p (рис. 3). При выполнении компьютерного эксперимента исследовалась зависимость тягово-энергетических характеристик электропривода от величины намагничивающего тока в диапазоне $I_m = 1 \div 1,5 I_{mnom}$.

Особенности эксплуатации рассматриваемой системы электропривода предполагают, помимо диапазона скоростей 5÷7 км/ч, еще более низкие значения – 1÷2 км/ч, при которых работа ЛАД в установившемся режиме является неэффективной, так как в таком режиме КПД $\eta < 0,3$ (движение подвижного состава через мюечную позицию или движение через различные измерительные комплексы, применяемые в локомотивном и вагонном хозяйстве).

С помощью компьютерных моделей рассмотрена возможность работы ЛАД в режиме, отличающемся от рассмотренных выше тем, что скорость на участ-

ке установившегося движения не поддерживается постоянной, а колеблется около среднего значения, задаваемого регулятором скорости. В фазе разгона привод разгоняется до верхней границы «скоростного коридора», после этого преобразователь отключается, сцеп движется в режиме выбега до достижения нижней границы «коридора», преобразователь включается снова, и цикл повторяется. На рис. 6 показаны временные зависимости скорости (мгновенной v и заданной v_3), фазного тока ЛАД i_A и тягового усилия F_x . Тяговые расчеты показали, что электропоезд типа ЭР-2 десятивагонной составности в режиме выбега имеет замедление $a_m = 0,012$ м/с². Это означает, что уменьшение скорости на 1 км/ч в рассматриваемом диапазоне скоростей будет происходить приблизительно за 23 с. С точки зрения буксируемого сцепа тяговое усилие должно быть таким, чтобы уменьшить динамические нагрузки в сцепных устройствах подвижного состава.

Выполненные расчеты на компьютерных моделях показали, что наиболее рациональным в указанном диапазоне скоростей является использование ширины «коридора», равной $\Delta v \approx 0,1$ м/с.

Необходимо отметить, что в процессе каждого включения инвертора в начале фазы разгона происходит пуск при ненулевых начальных условиях, плавность которого способна обеспечить лишь система с датчиком скорости.

Результаты моделирования показали следующее:

1. DCC- и DSC-принципы управления показали свою работоспособность в низкоскоростном линейном электроприводе. Использование принципа прямого управления моментом показало неудовлетворительную устойчивость системы в режиме электродинамического торможения в зоне скоростей менее 0,6 м/с.

2. В кривых фазного тока при DSC-алгоритме управления присутствуют высокие гармоники из-за отсутствия синусои-

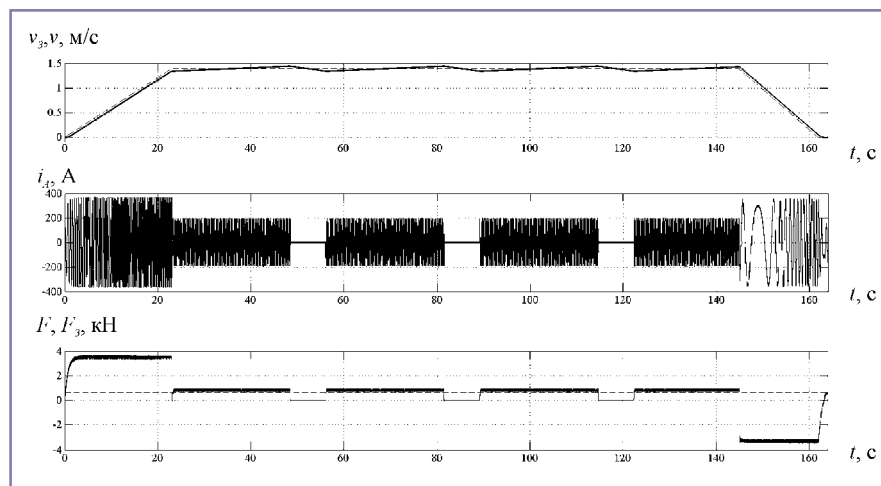


Рис. 6. Функционирование электропривода при реализации режима дискретного питания.

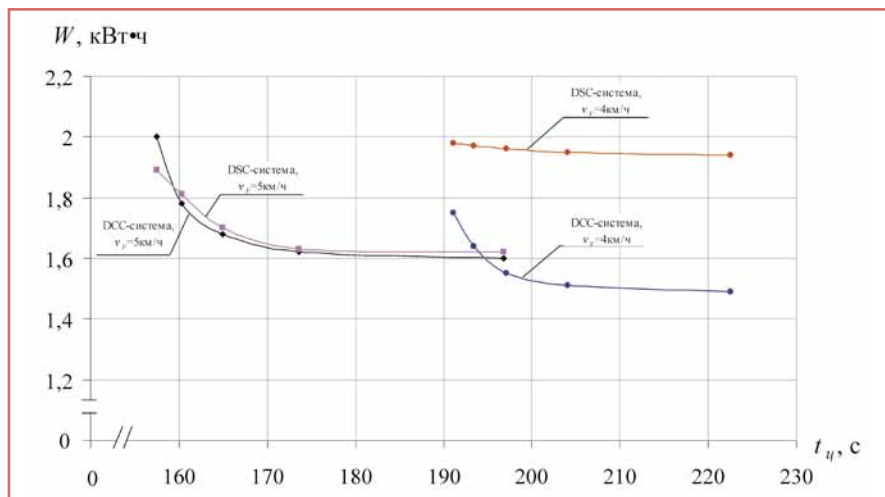


Рис. 7. Зависимости расхода электроэнергии за цикл $W=f(t_{ц})$ при различных скоростях установившегося движения и использовании DCC- и DSC-алгоритмов управления.

дальней широтно-импульсной модуляции, наибольший вес имеют гармоники с частотами $f_2=12$ Гц и $f_5=30$ Гц. КПД преобразователя при этом будет выше по сравнению с DCC-системой из-за более низких потерь в транзисторах, определяемых частотой их коммутации.

3. Усиление магнитного поля в зазоре ЛАД позволяет повысить энергетические показатели электропривода. Наилучшие результаты достигаются при усилении поля в режиме разгона на (40÷50)% (ограничение по насыщению зубцов индуктора), в режиме установившегося движения – на $\cong 20\%$; потребление электроэнергии при разгоне уменьшается в 1,5-2 раза, в режиме установившегося движения КПД машины увеличивается на 4-5%.

4. С точки зрения энергопотребления наиболее экономичным является режим минимального ускорения и замедления (таблица 1). Графики зависимостей расхода электроэнергии W от времени цикла $t_{ц}$ представлены на рис. 7 для скоростей установившегося движения 4 и 5 км/ч при реализации DCC- и DSC-принципов управления и усиления поля.

5. Наиболее рациональным с точки зрения энергопотребления является режим дискретного питания с продолжительностью включения привода на участке установившегося движения ПВ=40÷70%. При ширине коридора $\Delta v=0,1$ м/с и тяговом усилии $F=10$ кН расход электроэнергии на участке установившегося движения снижается на 8÷10%, при скоростях движения 1÷2 км/ч – на 5÷7 %.

Литература:

1. Елифанов Г.А. Возможности использования линейного асинхронного привода в ремонтном оборудовании депо. Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения, 2011. – Вып. 4 (29). – 283 с. С. 43-47.
2. Елифанов Г.А., Мазнев А.С. Расчет характеристик линейного асинхронного двигателя транспортного модуля для перемещения и позиционирования вагонов в условиях депо. Электроника и электрооборудование транспорта. – Изд-во НПП «Томилинский электронный завод», 2012. – № 2-3. – 56 с. С. 29-32.
3. Скобелев В.Е., Соловьев Г.И., Елифанов А.П. Анализ путей улучшения характеристик тяговых линейных асинхронных двигателей для высокоскоростного наземного транспорта. «Железные дороги мира», 1978, №2, с.3-12.
4. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока – СПб.: Питер, 2008. – 350 с., ил.
5. Домбровский В.В., Зайчик В.М. Асинхронные машины: Теория, расчёт, элементы проектирования. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 368 с.
6. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – М.: Транспорт, 1985. – 288 с.
7. Энергосберегающий асинхронный электропривод / под ред. И.Я. Браславского. – М.: АCADEMA, 2004. – 248 с.
8. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в matlab 6.0. – СПб: КОРОНА принт, 2001. – 320 с.
9. Бродовский В.Н., Иванов Е.С. Приводы с частотно-токовым управлением. – М.: Энергия, 1974. – 169 с.
10. Анализ возможностей усовершенствования алгоритмов управления комплектом преобразо-

вательного оборудования, нагруженного на линейный асинхронный тяговый двигатель макетной подвижной единицы монорельсовой транспортной системы: НИР к договору №31-2001. / Хосидов З.К. – Санкт-Петербург: ЗАО НПП «ЭПРО», 2002. – 39 с.

11. Формалев В. Ф., Ревизников Д. Л. Численные методы. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 400 с.

Елифанов Григорий Алексеевич – родился в 1988 году. В 2010 году окончил Петербургский государственный университет путей сообщения по специальности «Электрический транспорт железных дорог». Опыт работы 4 года. В настоящее время работает инженер по ремонту в филиале АО «Сименс АГ», является аспирантом ПГУПС. Имеет 4 печатные работы.

Мазнев Александр Сергеевич – 1939 года рождения. В 1961 году окончил Уральский электромеханический институт инженеров железнодорожного транспорта. Защитил докторскую диссертацию по теме: «Поиск эффективных технических решений тягового привода электрического подвижного состава с тиристорными преобразователями». В настоящее время является профессором кафедры «Электрическая тяга» Петербургского государственного университета путей сообщения, действительным членом Академии электротехнических наук Российской Федерации. Автор более 410 печатных трудов, включая патенты. Имеет медали, звания «Заслуженного изобретателя РФ», «Почетного железнодорожника», «Почетного работника Октябрьской железной дороги», грамоты Министерства путей сообщения и Министерства транспорта России.

Yepifanov Griroriy – was born in 1988. In 2010 he graduated from St. Petersburg State Railway University, speciality is «Railway Electric Transport». He has 4 work experience. At present he is a service engineer in AO «Siemens AG» branch, an advanced student of PGUPS. He has 4 printed works.

Maznev Alexandr – was born in 1939. In 1961 he has graduated Ural electromechanical University of Transportation. He has defended the dissertation by theme: «The search for effective solutions electric traction drive vehicles with thyristor converters». Now he is a professor at the Department «electric traction» of Petersburg State University of Communications. Also he is a member of the Academy of Electrical Sciences of the Russian Federation. Has 410 printed works, including patent for invention. He has a medals, the titles «Honored inventor of RF», «Honorable railway», «Honour the October railroad worker», letters of the Ministry of Railways and the Ministry of Transport of Russia.

Комплексный подход к разработке перспективного показателя надёжности электрооборудования автомобиля

// Complex approach to development of the perspective reliability index of electrical equipment of an auto car //

Заятров А.В.,
Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти

В работе рассматривается взаимосвязь между показателями надёжности и индексами удовлетворённости для легковых автомобилей и условия их применимости.

Ключевые слова: качество, надёжность, автомобиль, удовлетворённость, электрооборудование.

The author studies in his work interconnection between reliability and satisfaction indexes for auto cars and conditions of their application.

Keywords: quality, reliability, auto car, satisfaction, electrical equipment.

Решение проблемы повышения качества и надёжности современного автомобиля является основным направлением на пути обеспечения конкурентоспособности отечественного автомобилестроения. Поскольку ключевой системой автомобиля, в значительной степени определяющей результирующую надёжность транспортного средства, является электрооборудование, то разработка прогрессивных инструментов анализа и последующая реализация требуемых мероприятий по предотвращению отказов должны быть направлены на данную систему.

Применяемая в настоящее время оценка надёжности основана на использовании традиционных показателей, ориентированных на определение параметров долговечности (вероятность безотказной работы, интенсивность и частота отказов и др.) и уровня затрат (ремонтотпригодность). Дополнительное использование более новых индексов GMF, привязанных к определённому месяцу эксплуатации, позволяет осуществлять моделирование и прогнозирование надёжности в интересующих временных интервалах. Однако всего этого уже недостаточно, и для решения обозначенной проблемы требуется принципиально новый подход. С этой целью предлагается преобразовать имеющуюся структуру анализа надёжности, дополнив её исследованием показателей удовлетворённости.

Оценку степени удовлетворённости потребителей качеством товаров или услуг проводят многие автомобильные компании. Цель подобных исследований заключается в попытке удовлетворить определённые запросы и потребности потребителей, преобразовав возможности компании в соответствие с запросами клиентов. Анализ удовлетворённости позволяет выделить те аспекты, которые в

большей степени ориентируют потребителя на приобретение определённой продукции с последующей организацией приоритетных путей улучшений.

Однако оценка удовлетворённости может быть использована также для более полного анализа надёжности автомобиля за счёт получения принципиально новой информации, отсутствующей в гарантийной базе данных эксплуатации.

Целью данной работы является всесторонний анализ комплексного подхода к измерению надёжности электрооборудования в период эксплуатации, определение взаимосвязи между индексами надёжности и удовлетворённости, а также определение границ применимости методики.

Решение проблемы надёжности изделий электрооборудования заключается в организации и осуществлении комплексного подхода к поставленному вопросу, охватывающего все доступные методы и источники информации. В соответствии с этой задачей была разработана структура, представлен-

ная на рис. 1, и проведены соответствующие исследования.

Разработанная модель исследования состоит из трёх этапов. На первом этапе осуществлено исследование надёжности автомобиля и его основных систем с использованием гарантийной базы данных для автомобилей одного из наиболее популярных семейств автомобилей

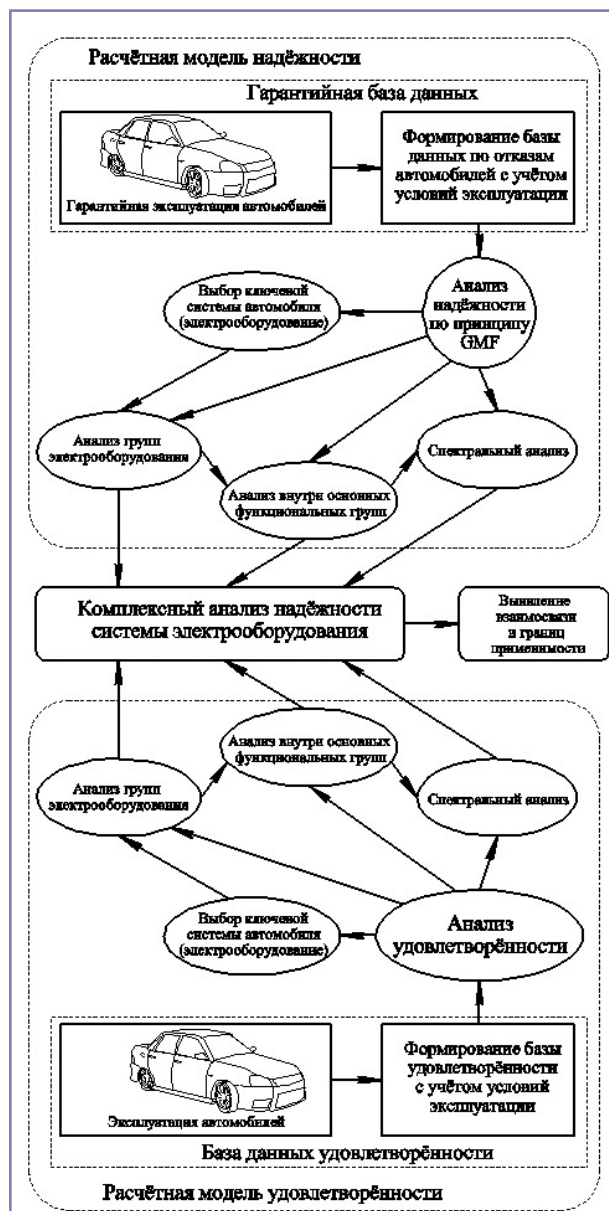


Рис. 1. Структура исследования.

Таблица 1. Рейтинг показателей надёжности от месяца эксплуатации.

№ п/п	Период эксплуатации автомобиля	
	3 месяца	12 месяцев
1	Электромеханические преобразователи	Электромеханические преобразователи
2	Датчики	Электронные устройства
3	Исполнительные устройства	Датчики
4	Электронные устройства	Исполнительные устройства
5	Переключатели	Переключатели
6	Контакты	Провода
7	Реле	Контакты
8	Провода	Реле

Таблица 2. Рейтинг показателей удовлетворённости от месяца эксплуатации.

№ п/п	Период эксплуатации автомобиля	
	3 месяца	12 месяцев
1	Электромеханические преобразователи	Электромеханические преобразователи
2	Исполнительные устройства	Исполнительные устройства
3	Электронные устройства	Электронные устройства
4	Контакты	Датчики
5	Датчики	Контакты
6	Реле	Переключатели
7	Переключатели	Провода
8	Провода	Реле

отечественного производства. Входными данными для первого этапа исследования послужила информация, полученная на основе гарантийной эксплуатации автомобиля ведущего российского производителя в течение 2012 года. Промежуточным итогом данной стадии выявлена ключевая система автомобиля – электрооборудование, вносящая наиболее значимый вклад в формирование результирующей надёжности транспортного средства. В качестве параметров, используемых для оценки надёжности, выбраны индексы GMF, взаимосвязь которых с традиционными характеристиками надёжности была представлена в более ранней работе [2].

Дальнейшим шагом явился подробный анализ системы электрооборудования с предварительным распределением всех отказов по функциональным группам элементов. В первую группу вошли все изделия, имеющие в своём составе электромеханические преобразователи, вторую группу образуют электронные устройства, третью – группа датчиков, четвёртую – исполнительные устройства (катушки зажигания, аккумуляторные батареи, звуковой сигнал), пятую – переключатели, шестую – все виды контактов, седьмую – реле, восьмую – электропроводка.

После распределения всех отказов по сформированным группам на протяжении двух анализируемых временных интервалов был сформирован рейтинг надёжности, представленный в таблице 1.

Заключительным этапом первой стадии исследования явилось подробное рассмотрение основных групп элементов электрооборудования, а именно групп

электромеханических устройств, электронных устройств, датчиков и исполнительных устройств, дополнительно к этому был сформирован рейтинг надёжности устройств для каждой из групп, также выполнено спектральное моделирование для 20 наименее надёжных устройств в соответствии с методикой, рассмотренной ранее в работе [3].

Второй этап исследования имеет аналогичную структуру, но в данном случае рассматриваются индексы удовлетворённости с использованием другой информационной базы. На данной стадии система электрооборудования также возглавила рейтинг удовлетворённости среди основных систем автомобиля, означающий наличие максимального количества отказов в данной системе. Аналогично предыдущему этапу был сформирован рейтинг удовлетворённости среди основных функциональных групп элементов электрооборудования, представленный в таблице 2, а также детально проанализировано распределение отказов внутри каждой из групп и в общей совокупности.

Третий этап является основным, позволяя определить наличие взаимосвязи между данными, полученными из различных информационных источников. В частности, оценка степени тесноты связи между полученными показателями надёжности и индексами удовлетворённости была осуществлена с использованием коэффициентов корреляции Пирсона и Спирмена.

Коэффициент корреляции Пирсона (r), известный также как коэффициент линейной корреляции, характеризует собой тесноту линейной связи между контроли-

руемыми параметрами. В случае получения высокой корреляции зависимость между исследуемыми параметрами может быть представлена графически с помощью регрессионной прямой.

Коэффициент корреляции Пирсона вычисляется следующим образом

$$r = \frac{N \sum_{i=1}^N (K_i E_i) - \sum_{i=1}^N K_i \sum_{i=1}^N E_i}{\sqrt{\left(N \sum_{i=1}^N K_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N K_i \right)^2 \right) \left(N \sum_{i=1}^N E_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N E_i \right)^2 \right)}} \quad (1)$$

где N – количество позиций в исследуемой группе элементов (групп в системе); K_i – значение индекса надёжности, ‰; E_i – значение индекса удовлетворённости, ‰.

Недостатком данного метода оценки взаимосвязи является сильное влияние выбросов на итоговый результат, что может привести к искажённой оценке. Другим слабым местом подхода является необходимость использования большого количества анализируемых параметров с целью получения надёжного результата. В связи с этим коэффициент корреляции Пирсона целесообразно применять при обработке больших массивов данных, например, при анализе надёжности по отдельным системам автомобиля. В случае малого объёма выборки наиболее применимы непараметрические методы статистики.

Вторым способом определения наличия взаимосвязи между параметрами является использование непараметрического метода – коэффициента ранговой корреляции Спирмена (r_s). Несмотря на то, что мощность коэффициента ранговой корреляции Спирмена уступает аналогичной характеристике линейного коэффициента корреляции, ранговая корреляция более предпочтительна при оперировании небольшими объёмами анализируемых значений.

Коэффициент ранговой корреляции Спирмена вычисляется следующим образом

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^N d_i^2 + T_K + T_E}{N(N^2 - 1)} \quad (2)$$

где d_i – разность между рангами сопоставляемых параметров;

N – количество позиций в исследуемой группе элементов;

T_K и T_E – поправки на одинаковые ранги для индексов надёжности и удовлетворённости соответственно

$$T_K = \frac{\sum_{i=1}^n (k^3 - k)}{12} \quad T_E = \frac{\sum_{i=1}^m (l^3 - l)}{12} \quad (3)$$

где k – объём каждой из групп одинаковых рангов в ряду индексов надёжности;

l – объём каждой из групп одинаковых рангов в ряду индексов удовлетворённости.

В соответствии с обоими описанными выше методами оценки были рассчитаны коэффициенты корреляции для основных групп электрооборудования, а также для

Таблица 3. Коэффициенты корреляции для групп
и устройств системы электрооборудования.

Наименование	3 месяца эксплуатации		12 месяцев эксплуатации	
	r	r_s	r	r_s
Электрооборудование	0,82	0,73	0,78	0,85
Электромеханические преобразователи	0,61	0,53	0,58	0,82
Электронные устройства	-0,02	0,24	0,55	0,09
Датчики	-0,31	-0,39	0,87	0,74
Исполнительные устройства	0,08	0	0,39	0,51
Без функциональной принадлежности	0,72	0,61	0,51	0,47

устройств из значимых функциональных групп. Результаты расчётов для двух временных интервалов сведены в таблицу 3.

Анализ полученных результатов позволил выявить границы применимости комплексного анализа надёжности. Выделенные в таблице 3 значения синим цветом превышают критические с вероятностью ошибки менее 5%, что говорит о возможности принятия их как статистически значимых и отвергнуть гипотезу об отсутствии корреляции между параметрами. Однако качественная характеристика силы связи, в соответствии со шкалой Чеддока, показывает высокий уровень взаимосвязи только для групп электрооборудования за оба исследуемых интервала, а также для группы электромеханических устройств и датчиков за 12-ти месячный промежуток эксплуатации.

Полученные коэффициенты корреляции позволяют сформулировать границы применимости данного подхода. Высокая мера тесноты связи, прослеживаемая среди всех групп электрооборудования за оба промежутка времени, скорее всего, вызвана примерно одинаковым характером расположения устройств в составленных ранее рейтингах. Также высокий уровень взаимосвязи характерен для ключевой группы устройств, в данном случае это оказались изделия, имеющие в своём составе электромеханические преобразователи (генераторная установка, электро-стеклоподъёмник, электроусилитель руля и др.). Хороший уровень корреляции среди группы датчиков может быть связан с большим количеством позиций в каждом из рейтингов.

Слабая взаимосвязь между группами исполнительных устройств и электронных

изделий может быть объяснена, с одной стороны, малым количеством данных для сопоставления внутри каждой из групп, с другой – отсутствием в рейтинге надёжности таких позиций как лампы, свечи зажигания, лидирующих по количеству отказов в рейтинге удовлетворённости. Вместе с тем, низкие значения коэффициента корреляции для отдельных групп устройств следует рассматривать не как отсутствие взаимосвязи между анализируемыми индексами, а как недостаточное количество исходных данных.

Отдельно стоит отметить, что для оценки степени тесноты связи предпочтительней использовать более продолжительные временные интервалы (12 месяцев эксплуатации), поскольку 3-х месячный интервал в большей степени ориентирован на качество продукции, и в меньшей – на надёжность. Возникающие на протяжении первых месяцев эксплуатации отказы носят преимущественно единичный характер, особенно это характерно для индексов удовлетворённости, что не позволяет получить достоверные результаты.

Достижению высокого уровня тесноты связи будут способствовать дальнейшие исследования в данном направлении, позволяющие с одной стороны повысить достоверность имеющихся результатов, а с другой – отслеживать динамику их изменения во времени. Таким образом, результаты исследований позволили подтвердить эффективность комплексного подхода к анализу надёжности электрооборудования автомобиля, выявили недостатки разрозненного рассмотрения индексов надёжности и удовлетворённости и границы их применения.

Литература:

1. Боровиков В.П. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере [Текст] / В.П. Боровиков – СПб.: Питер, 2003. – 688 с.
2. Зятров А.В. Анализ и оценка взаимосвязей между традиционными показателями надёжности и показателями, используемыми ведущими производителями легковых автомобилей [Текст] / А.В. Зятров, В.Н. Козловский // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2012. – №1. – с. 41 – 43.
3. Зятров А.В. Спектральное моделирование надёжности системы электрооборудования автомобилей [Текст] / А.В. Зятров, В.Н. Козловский // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2012. – №4. – с. 44 – 47.
4. Кендэл М. Ранговые корреляции. – Зарубежные статистические исследования [Текст] / М. Кендэл. М.: «Статистика», 1975. – 216 с.
5. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников [Текст] / А.И. Кобзарь. – М.: «ФИЗМАТ-ЛИТ», 2006. – 816 с.
6. Козловский В.Н. Обеспечение качества и надёжности электрооборудования автомобилей: монография [Текст] / В.Н. Козловский. – Тольятти: ГОУ ВПО «ТГУ», – 2009. – 274 с.
7. Козловский В.Н. Концепция обеспечения качества и надёжности автомобилей и автомобилей с гибридной силовой установкой [Текст] / В.Н. Козловский, В.И. Строганов // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2012. – №5-6. – с. 49 – 52.

Зятров Алексей Викторович – в 2010 году окончил Тольяттинский государственный университет по специальности «Электрооборудование автомобилей и электромеханика». В настоящее время работает ведущим инженером в научно-исследовательском отделе «Электронные системы контроля» университета, где занимается перспективными вопросами обеспечения качества и надёжности электрооборудования автомобилей в период эксплуатации.

Zyatov Aleksey – in 2010 he graduated from Tolyatti State University, speciality is «Automobile electric equipment and electromechanics». At present he works as the leading engineer in the research department «Electronic control systems» in the university, where he deals with perspective questions of automobile electric equipment quality supply and safety during operation period.

Методы определения форсированных режимов испытаний тяговых электрических машин электроподвижного состава

// Methods of definition of the forced modes of tests of traction electric cars of the electrorolling stock //

Глущенко М.Д., д.т.н.,
МГУПС (МИИТ), г. Москва

Предложены гипотезы обоснования форсированных диагностических воздействий для тяговых двигателей электроподвижного состава на основе равенства преобразованных энергий и эквивалентных режимов накопления повреждений в изоляционных конструкциях.

Ключевые слова: гипотеза, форсирование, режим, преобразование энергии, тепловое старение, изоляция, электрическая машина.

Форсирование режимов испытаний технических устройств позволяет оценить их работоспособность не только при воздействии повышенных нагрузок, но и определить особенности их старения и износа, а также прогнозировать ресурс. При испытаниях тяговых электрических машин электроподвижного состава на испытательных станциях режим их работы обеспечивается за счёт метода взаимной нагрузки [4,5]. Однако, как правило, рекомендуемые режимы испытаний неадекватны реальным эксплуатационным режимам. В частности, для тяговых электрических машин электроподвижного состава характерны нестационарные режимы в виде чередования работы под током и на выбеге, а также в виде флуктуаций тока, напряжения или частоты вращения. Кроме того, эксплуатационные режимы являются случайными процессами, что затрудняет их реализацию на стенде взаимной нагрузки. Поэтому определение адекватных режимов работы тяговых электрических машин в процессе испытаний представляет практический интерес.

Решение такой задачи возможно на основании гипотез, учитывающих особенности электромагнитных и тепловых процессов, происходящих в тяговых электрических машинах. Одна из них заключается в равенстве энергий, преобразованных электрической машиной в процессе эксплуатации E_{Σ} и в процессе испытаний $E_{\text{и}}$

$$E_{\Sigma} = E_{\text{и}} \quad (1)$$

Результаты эксплуатационных испытаний электроподвижного состава (электропоезды, электропоезда, вагоны метрополитена) с целью анализа режимов работы тяговых электрических машин позволяют

The hypotheses of a substantiation of diagnostic influences for draw electrical machines the rolling-stock are stated on the basis of equality transformed energy and equivalent modes of accumulation of damages in isolation designs.

Keywords: hypothesis, speeding up, mode, energy transformation, thermal ageing, isolation, the electric car.

охарактеризовать выполняемое ими преобразование энергии во времени в виде суммы двух составляющих

$$E(t) = \eta(t)\bar{E} + \eta(t)\tilde{E}(t) = E_{\eta}(t) + E_{\nu}(t) \quad (2)$$

где $\bar{E}$ – среднее значение процесса; $\tilde{E}$ – флуктуации процесса, как отклонение параметров электрических или механических нагрузок относительно среднего значения; $\eta(t)$ – импульсный процесс с единичной амплитудой, периодом повторения импульсов – T_{η} , длительностью импульсов – $T\eta$.

Первое слагаемое выражения (2) $E_{\eta}(t)$ представляет собой импульсный процесс с постоянной амплитудой и характеризует нестационарность преобразования энергии, обусловленную только включением-выключением тока – событиями, вызванными чередованием работы под током и на выбеге. Анализ режимов работы электроподвижного состава показывает, что интервалы времени ΔT до ближайшего события слева или справа (включение или выключение тока) имеют плотность вероятности экспоненциального распределения

$$q(\Delta T) = \nu e^{-\nu \Delta T} \quad (3)$$

где ν – число событий в единицу времени.

На основании теории случайных процессов это позволяет утверждать, что процесс $E_{\eta}(t)$ соответствует потоку Пуассона [7]. Наиболее полной характеристикой такого процесса является функция спектральной плотности

$$S_{\eta}(f) = \frac{\nu \bar{E}^2}{4(\nu^2 + \pi^2 f^2)} \quad (4)$$

где f – частота.

Второе слагаемое выражения (2) характеризует отклонения нагрузок относительно среднего значения (флуктуации) и является произведением двух случайных процессов, поэтому его итоговая спектральная плотность $S_{\nu}(f)$ соответствует произведению спектральной плотности от произведения процессов $\eta(t)$ и $\tilde{E}(t)$

$$S_{\nu}(f) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_{\eta}(\lambda) \tilde{S}_{\eta}(f-\lambda) d\lambda \quad (5)$$

где $\tilde{S}_{\eta}(f-\lambda)$ – функция спектральной плотности флуктуаций тока, сдвинутая относительно исходной функции на частоту λ . Поскольку функция спектральной плотности характеризует распределение энергии процессов по частоте, в процессе испытаний и эксплуатации указанные функции должны быть одни и те же

$$S_{\eta\text{и}}(f) = S_{\eta\Sigma}(f), S_{\nu\text{и}}(f) = S_{\nu\Sigma}(f) \quad (6)$$

где индексы «Э» и «И» соответствуют работе электрической машины в нормальных условиях, т.е. в процессе эксплуатации и при моделировании электрических нагрузок в процессе испытаний.

Условия (6) дополняют рекомендации ГОСТ 2582-81 по воспроизведению режимов работы тяговых электрических машин в процессе их испытаний. Режим испытаний в этом случае можно определить в виде последовательности значений тока и напряжения. Синтез значений такой последовательности производится с помощью ЭВМ, при этом учитываются конкретные режимы и особенности эксплуатации. Критерием адекватности при этом служат равенства (6).

Другая гипотеза обоснования параметров диагностических воздействий может быть основана на адекватном воспроизведении потерь энергии и, соответственно, тепловых режимов, что даёт возможность определить «реакцию» на тепловые воздействия одного из наиболее слабых звеньев электрической машины – изоляционной конструкции [3]. При этом целесообразно применять форсированные тепловые воздействия, параметры которых можно установить на базе теории ускоренных испытаний. Применительно к изоляционным конструкциям ускоренное старение изоляции достигается за счёт увеличения интенсивности нагрева, вызываемого электрическими и магнитными

потерями, ила за счёт снижения интенсивности охлаждения. Степень форсирования старения изоляции характеризуется коэффициентом форсирования K_ϕ , представляющим собой отношение продолжительности работы изоляции в эксплуатационных условиях T_ϕ по отношению к продолжительности работы при форсированных режимах на испытательном стенде T_ϕ . Необходимо отметить, что испытание в обычных режимах является частным случаем испытаний при форсированных режимах, принимая при этом $K_\phi=1$.

Изоляционная конструкция электрической машины – многоэлементная система [1,2,3]. Каждый элемент имеет свои особенности режимов работы из-за температурного и электростатического поля, статических и динамических усилий. В целом при форсировании режимов требуется воспроизвести полный комплекс эксплуатационных нагрузок, но степень старения изоляции из-за различных факторов в процессе диагностирования должна соответствовать старению в эксплуатации, что приводит к утверждению: старение изоляции в процессе диагностики должно быть подобно старению в эксплуатации. Это означает, что должно выполняться условие подобия вида

$$\frac{Q_{\phi i}}{Q_{\phi j}} = \frac{Q_{\phi i}}{Q_{\phi j}} = idem \quad (7)$$

где $Q_{\phi i}$, $Q_{\phi j}$ – старение элементов изоляции в эксплуатации; $Q_{\phi i}$, $Q_{\phi j}$ – старение в процессе форсирования режимов; i, j – номера элементов изоляции.

Согласно предположениям, используемым в теории электрических машин, старение изоляции подразделяется на тепловое Q_T и термомеханическое Q_M . Первая составляющая Q_T приводит к химическим реакциям в изоляции: распаду межмолекулярных связей, улетучиванию компонентов, потерей массы и др. Вторая составляющая Q_M приводит к нарушениям механической прочности изоляции, появлению в ней микротрещин, расслоений, вследствие чего изоляция становится склонной к накоплению в ней влаги, пыли, а в итоге – к снижению пробивного напряжения.

Тепловое старение изоляции, согласно закону Вант-Гоффа-Аррениуса, а также «правилу Монтзингера», экспоненциально зависит от температуры. Тогда можно считать, что за единицу времени старение составит

$$Q_T = K_\theta e^{b_\theta \theta} \quad (9)$$

где K_θ , b_θ – коэффициенты, учитывающие класс и свойства изоляции.

Для любого элемента изоляции условие испытаний, учитывающее ускоренное температурное старение, принимает вид

$$T_\phi e^{b_\theta \theta_\phi} = T_\phi e^{b_\theta \theta_\phi} \quad (10)$$

где θ_ϕ , θ_ϕ – температура изоляции в эксплуатации и при испытаниях в форсирован-

ном режиме работы; T_ϕ , T_ϕ – длительности работы ТЭД в эксплуатации и форсированном режимах.

Учитывая (9) и (10), можно показать, что

$$\theta_\phi = \theta_\phi + \frac{\ln K_\phi}{b_\theta} \quad (11)$$

Следовательно, температура всех элементов обмоток в процессе диагностирования при $K_\phi \neq 1$ должна отличаться от «эксплуатационной» на постоянную величину

$$\Delta\theta = \frac{\ln K_\phi}{b_\theta} \quad (12)$$

Термомеханическое старение изоляции Q_M в основном обусловлено циклическостью изменения температуры вследствие нестационарности электрических и магнитных потерь, что подтверждается данными литературы [1,6] и экспериментами. Вследствие этого старение обмоток и изоляции из-за термомеханических сил можно считать равным отношению числа сверхъёмных циклов нагрузки n к числу циклов до полного разрушения N . Известно, что накопление усталостных повреждений нелинейно зависит от уровня нагрузки. Например, согласно теории усталостных явлений применительно к металлическим конструкциям величина циклических механических напряжений σ и число циклов до разрушения связаны соотношением

$$N\sigma^m = const \quad (13)$$

где m – показатель кривой усталости.

Величина термомеханических напряжений обусловлена температурным полем в элементах изоляции электрической машины обусловлена градиентами температуры, поэтому можно считать, что

$$\sigma = Kg grad \theta \quad (14)$$

где Kg – коэффициент, характеризующий модуль упругости материалов изоляции и конструктивные особенности.

Учитывая (13), (14) и условие (7), подобия термомеханического старения изоляции обмоток электрической машины при эксплуатации и в процессе диагностирования будут иметь вид

$$\frac{grad \theta_{j\phi}}{grad \theta_{i\phi}} = \frac{grad \theta_{j\phi}}{grad \theta_{i\phi}} \quad (15)$$

Данное условие будет автоматически выполняться при выполнении условия (12), поскольку изменение температуры всех точек обмоток на одну и ту же величину сохраняет неизменным градиенты температур. Поэтому условие (12) можно принять за основу определения режимов работы электрической машины при её испытаниях в форсированных режимах, учитывающих термическое и термомеханическое старение изоляции.

Кроме этого, дисперсии процесса нагрева обмоток как в эксплуатации, так и в процессе диагностирования должны быть одни и те же, поскольку увеличение всех

значений случайного процесса на одну и ту же величину, согласно (12), не изменяет значения дисперсий процессов θ_ϕ , θ_ϕ .

Использование предложенной гипотезы рассмотрим на примере определения периодичности включения и выключения тока диагностируемого тягового электродвигателя с целью воспроизведения аналогичного эксплуатационного режима. Для этого, учитывая (12), необходимо определить дисперсию нагрева обмоток, обусловленную чередованиями работы под током и на выбеге. В этом случае достаточно использовать известное в теории нагревания электрических машин дифференциальное уравнение нагревания

$$\frac{d\theta}{dt} + \frac{\theta}{T_M} = \frac{\theta_\infty}{T_M} \quad (17)$$

где T_M – тепловая постоянная времени; θ_∞ – установившийся нагрев.

Учитывая методы преобразования случайных процессов, можно показать, что спектральные плотности установившегося и текущего нагревов будут отличаться на квадрат частотной характеристики

$$S_\theta(\omega) = \left(\frac{1}{\sqrt{\omega^2 T_M^2 + 1}} \right)^2 S_{\theta_\infty}(\omega) \quad (18)$$

где ω – круговая частота.

Следовательно, дисперсия текущей температуры обмоток будет

$$S_\theta^2 = \int_0^\infty S_\theta(\omega) d\omega = \int_0^\infty \frac{S_{\theta_\infty}(\omega)}{\omega^2 T_M^2 + 1} d\omega \quad (19)$$

Спектральная плотность установившегося перегрева как случайного процесса, сформированного на основе потока Пуассона, по аналогии с (4) будет равна

$$S_{\theta_\infty}(\omega) = \frac{v\theta_\infty^2}{\pi(4v^2 + \omega^2)} \quad (20)$$

После подстановки последнего выражения в (19) и выполнения преобразований получим функцию спектральной плотности текущего нагрева, обусловленного включениями и выключениями тока

$$S_\theta(\omega) = \frac{v\theta_\infty^2}{\pi(4v^2 + \omega^2)(\omega^2 T_M^2 + 1)} \quad (21)$$

Следовательно, дисперсия температуры обмоток, обусловленная включениями и выключениями тока, составит

$$S^2 = \int_0^\infty S_\theta(\omega) d\omega = \frac{\theta_\infty^2}{4\pi(1+2vT_M)} \quad (22)$$

Поскольку при моделировании электрических нагрузок в форсированных режимах и дисперсии нагрева должны быть равны, то необходимо соблюдать условие

$$\frac{\theta_{\infty\phi}^2}{4\pi(1+2v_\phi T_M)} = \frac{\theta_{\infty\phi}^2}{4\pi(1+2v_\phi T_M)} \quad (23)$$

Откуда требуемое число включений и выключений тока в единицу времени в процессе диагностирования будет равно

$$v_\phi = \frac{\theta_{\infty\phi}^2}{\theta_{\infty\phi}^2} \left(\frac{1}{2T_M} + v_H \right) - \frac{1}{2T_M} \quad (24)$$

Рассмотренные методы определения форсированных режимов испытаний успешно применялись при проведении ресурсных и ускоренных испытания головных образцов тяговых электродвигателей отечественного производства НБ-418к6, НБ-508, ТЛ-3, ЭД118, 1ДТ12. При учете результатов испытаний начато их серийное производство.

Литература:

1. Бернштейн Л.М. Изоляция электрических машин общепромышленного исполнения. – М.: Энергия, 1971. – 319 с.
2. Винокуров В.А., Попов Д.А. Электрические машины железнодорожного транспорта. – М.: Транспорт, 1986. – 511 с.
3. Гемке Р.Г. Неисправности электрических машин. – Л.: 1989. – 331 с.
4. Гольдберг О.Д. Испытания электриче-

- ских машин. – М.: Высшая школа, 1990.
5. Захарченко Д.Д., Ротанов Н.А., Горчаков Е.В. Тяговые электрические машины и трансформаторы. – М.: Транспорт, 1979. – 303 с.
6. Журков С.Н. Бетехтин В.И., Петров А.И. Температурно-временная зависимость прочности металлов и сплавов в равновесном состоянии. Физика металлов и металловедение. Т. 24, вып 1,2. – М. 1967.
7. Горянинов В.Т., Журавлёв А.Г., Тихонов В.Н. Статистическая радиотехника. – М.: Сов. радио, 1980.

Глушченко Михаил Дмитриевич – родился в 1947 году. Окончил Московский институт инженеров транспорта по специальности «Электроподвижной состав». Доктор технических наук, доцент. В 1999 году защитил диссертацию по теме: «Проблемы эксплуатационной диагностики тяговых электродвигате-

лей подвижного состава и пути их решения». Опыт работы – 42 года. В настоящее время работает профессором кафедры «Электрическая тяга» МГУПС (МИИТ). Имеет 56 публикаций, 4 методических пособия, 4 авторских свидетельства.

Glushchenko Mikhail – was born in 1947. He graduated from Moscow Transport Engineer Institute specializing in «Electrically propelled vehicles». He is a Doctor of Engineering, docent. In 1999 he defended a thesis on the subject: «Problems of an operational test of traction electric motors of railway vehicles and ways of their solution.» He has 42 years of work experience. Currently he is occupied as a professor at the department «Electric traction» in MGUPS (MIIT). He has 56 publications, 4 technical guides, 4 copyright certificates.

Создание высокоточной модели инфраструктуры крупной железнодорожной станции для диагностики и дистанционного определения места короткого замыкания

// Create highly accurate model of the infrastructure the largest train station for diagnosis and remote determination of fault location //

Заруцкая Т.А., к.т.н.,
ФГБОУ ВПО «Ростовский государственный
университет путей сообщения», г. Ростов-на-Дону
Камардин О.В.
Юго-Восточная дирекция инфраструктуры –
структурного подразделения центральной дирекции
инфраструктуры – филиала ОАО «РЖД», г. Ростов-на-Дону
Триллер А.А.,
ООО «ЭнергоСпецПроект», г. Ростов-на-Дону

Сегодня на сети дорог остро стоит проблема дистанционного определения места короткого замыкания на секциях крупных железнодорожных станций. Создание адекватной модели, отражающей процессы, происходящие на станции при КЗ, является важным шагом к решению задачи диагностики и обнаружения повреждённой секции. В работе рассматриваются два различных варианта построения схемы замещения станции для проведения предварительных расчётов параметров аварийных режимов. Полученные результаты показывают, что разделение в схеме замещения тяговой сети на контактную сеть и рельсы при построении модели повышает её эффективность и даёт более достоверные результаты параметров аварийного режима.
Ключевые слова: станция, короткое замыкание, модель, параметры аварийного режима, модель станции, повышение точности расчётов, моделирование электрических процессов.

Today, the network of roads acute problem of remote determination of fault location on the sections large railway stations. Creating an adequate model that reflects the processes at the station Short Circuit, is an important step in solving the problem of diagnosis and detection of the damaged section. We consider two different ways to construct the equivalent circuit of the stations to preliminary calculations, the parameters of emergency operation. The results show that separation equivalent circuit power train network and the contact rails in the model increases its efficiency and gives more reliable results fallback options.
Keywords: station, a short circuit, the model, the parameters of the emergency regime, the station model, increasing the accuracy of calculations, modeling of electrical processes.

Бесперебойная и надёжная работа крупных железнодорожных станций и сортировочных узлов является одним из основных факторов снижения длительности задержек поездов и количества задержанных поездов. Однако при устойчивых коротких замыканиях (КЗ) в секциях тяговой сети станций бесперебойность и надёжность её работы может быть под угрозой. Сегодня при подобного рода КЗ определение повреждённых секции тяговой сети ведётся поочерёдным отключением разъединителей и последующей пробной подачей напряжения на секции тяговой сети станции. Это приводит к повышенному износу выключателя и силового трансформатора при включении на КЗ; опасности пережога контактной сети из-за многократного включения на КЗ; увеличению

объёма повреждений при неоднократном включении фидера на КЗ; увеличению времени поиска повреждения; необходимости вызова дежурного электромеханика на подстанцию. Таким образом, проблема диагностики и дистанционного обнаружения повреждений на секциях контактной сети крупных железнодорожных станций и сортировочных узлов представляет важную и трудоёмкую задачу.

В последние годы появились современные системы диагностики оборудования тяговых подстанций, регистраторы аварийных событий и процессов, построенные на микропроцессорных базовых модулях, а также мощные средства вычислительной техники АСУ на энергосистемных пунктах. Это открывает новые возможности по диагностике и обнаруже-

нию повреждённой секции тяговой сети станции. Вместе с тем, каждая станция имеет свою специфику: большое количество параллельных путей, разветвлённость, различное количество питающих тяговых подстанций, большое разнообразие путей протекания тягового тока, возможность изменения схем секционирования и т.д. Кроме того, на переменном токе в многопроводных тяговых сетях необходимо учитывать взаимную индуктивность между проводами и рельсами как одного пути, так и смежных путей. Все это затрудняет выделение аварийной секции на станции при КЗ даже с использованием мощных современных микропроцессорных систем.

Для решения поставленной задачи – дистанционного определения места короткого замыкания на крупной станции – можно воспользоваться комбинацией методов компьютерного моделирования и непосредственного измерения на базе регистраторов аварийных событий. В свою очередь, такой подход требует разработки компьютерной модели станции, на основе которой можно создать базу соответствия мест КЗ и параметров аварийного режима, организовать сбор информации об аварийном режиме и на основе полученных данных и модели станции принимать решение о месте короткого замыкания в режиме онлайн.

Расчёт токов короткого замыкания в тяговых сетях сложной конфигурации, к которым относится развитие путей крупной железнодорожной станции, в силу известных трудностей обычно стараются свести к упрощённым моделям. Как правило, в основе упрощённых моделей сложных станций, ввиду достаточно сложных математических расчётов, всегда лежали принципы эквивалентирования, которые применялись, начиная с определения сопротивления тяговой сети и заканчивая эквивалентированием части параллельных путей в парках. При этом для моделирования станции используют однолинейные схемы, пример которой представлен на рис. 1. Здесь контактная сеть и рельс заменяются одним эквивалентным сопротивлением. Очевидно, что это упрощение приводит к появлению допущений и погрешностей.

С развитием вычислительной техники представилась возможность избавиться от данного упрощения при моделировании станции и разделить тяговую сеть на со-

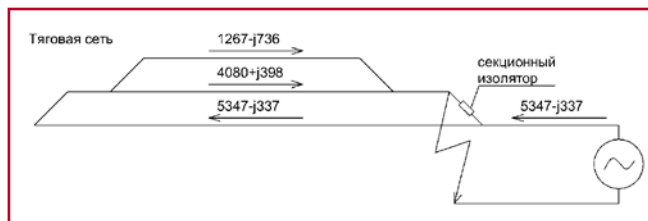


Рис. 1. Однолинейная модель станции.

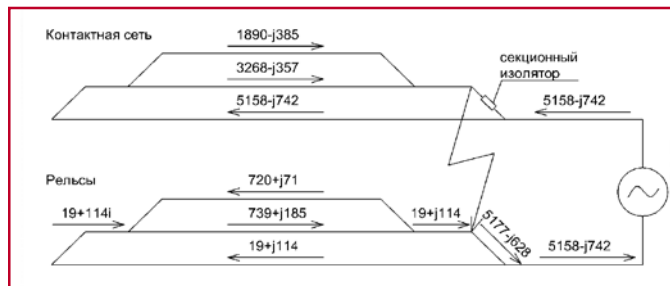


Рис. 2. Модель станции с разделением тяговой сети на контактную сеть и рельсы.

ставные части, а именно: контактную сеть и рельсы. Пример такого разделения показан на рис. 2.

Этот шаг позволяет повысить адекватность моделирования электрических процессов на станции. Из рисунков видно, что становится возможным исследовать электрические процессы протекания тока отдельно по контактной сети и по рельсам, что повышает детализацию расчётов. Уточнённое токораспределение во всей тяговой сети, несомненно, повлияет на увеличение точности определения параметров аварийного режима при КЗ, поэтому можно сделать закономерный вывод о том, что для получения достоверного результата необходимо индивидуально

для каждой конкретной станции рассчитывать параметры аварийного режима, т.к. каждая станция уникальна, и обязательно учитывать рельсовые нити. Кроме того, более корректное представление о процессах, происходящих при КЗ в различных точках тяговой сети станции, позволит дать более точный прогноз о возможном месте КЗ при сопоставлении результатов реальных замеров и результатов моделирования.

В качестве объекта исследования была выбрана станция «Лиски» Юго-Восточной железной дороги – филиала ОАО «РЖД», получающая питание по системе переменного тока. На рис. 3 при-

веден снимок станции Лиски из космоса.

Станция «Лиски» по основному назначению и характеру работы является сортировочной, по объёму – внеклассной станцией. Состоит из 5 парков. Питание станции осуществляется от одной тяговой подстанции Блочный завод, которая питает 4 направления. В качестве регистраторов аварийных событий на станции применяется система диагностики параметров подстанции (СДПП).

Как видно из описания технических характеристик и рисунка, станция имеет определенные особенности: развитую инфраструктуру, что выражается в серьезном путевом развитии, большое количество параллельных путей в парках, изгиб.

Для оценки повышения точности расчётов были построены модели двух типов: модель с разделением тяговой сети на составные части (контактную сеть и рельсы) и однолинейная модель, построенная по стандартным принципам эквивалентирования тяговой сети. В основу расчётов параметров аварийных режимов для обоих вариантов был положен матричный метод расчета электрических цепей.

Схема замещения станции «Лиски» была построена в масштабе путем нанесения на масштабный снимок станции из космоса двухниточного плана станции и трассировки. Двухниточный план станции необходим для учёта путей протекания тягового тока. А использование снимка станции из космоса позволяет технологически упростить построение схемы замещения станции в масштабе. Такое построение модели дает возможность максимально точно определить сопротивление пути протеканию токов как в контактной сети, так и в рельсовых нитях. В созданной модели учтены взаимные влияния друг на друга до 5-ти путей, а также учтена возможность возникновения коротких замыканий в любой точке тяговой сети каждого пути станции.

Расчет параметров аварийного режима (ток, напряжение, сопротивление петли КЗ) проводился для множества точек, полученных с интервалом 50 м по всем путям. В качестве контрольных точек для дальнейших исследований был выбран 4, 5 и 9 путь в северном парке станции «Лиски». Контрольные точки показаны на рис. 4.

Вторая модель создавалась аналогично первой, но с использованием эквивалентных сопротивлений, полученных при



Рис. 3. Снимок станции «Лиски» из космоса.

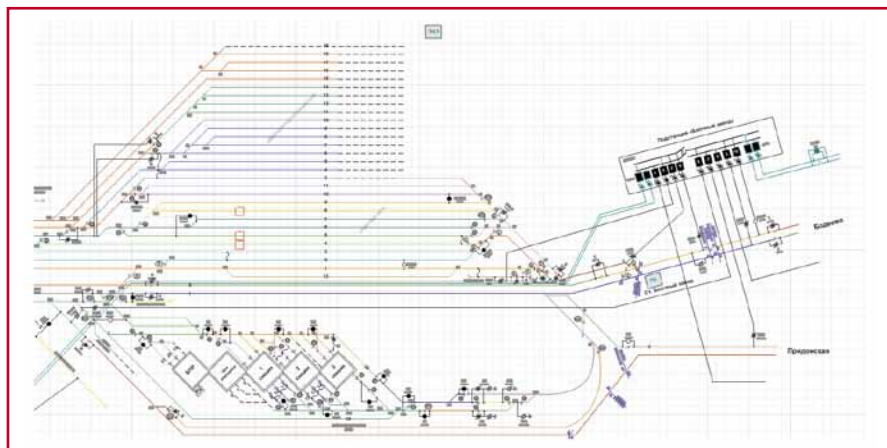


Рис. 4. Фрагмент принципиальной схемы станции «Лиски» (красными квадратами обозначены места проведения КЗ).

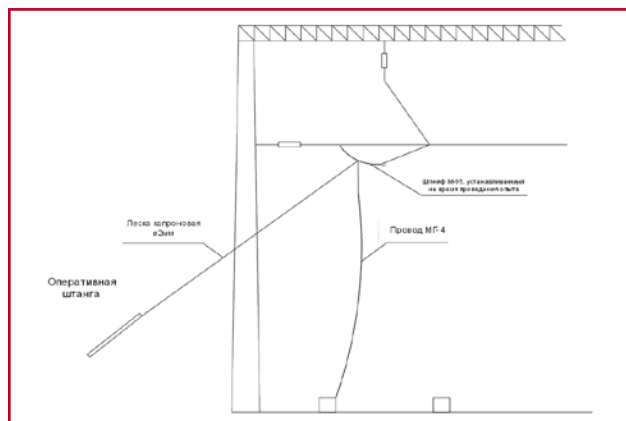


Рис. 5. Схема, поясняющая процесс проведения опыта КЗ через дугу.

объединении контактной и рельсовой цепи в тяговую сеть. Взаимные влияния также учитывались до 5-го пути по всей станции. В результате на второй модели также были получены параметры аварийных режимов для того же множества точек КЗ.

Для проверки достоверности построенных моделей были проведены натурные испытания на станции «Лиски».

Схема, поясняющая процесс проведения опытов, представлена на рис. 5. Были проведены три опыта короткого замыкания в контрольных точках Северного парка станции (опоры №115, 116, 137). Испытания проводились в июле 2011 года. Чтобы опыт был приближен к реальным условиям, применялся шлейф для имитирования короткого замыкания, в результате чего КЗ происходило через дугу. Во время испытаний движение на станции не прекращалось, схема была нормальной, т.е. эксперимент был максимально приближен к реальным условиям эксплуатации.

Система диагностики параметров подстанции (СДПП), установленная на тяговой подстанции Блочный завод, фиксировала параметры аварийного режима (токи, напряжения, сопротивление петли короткого замыкания, как активное, так и реактивное). Пример сбора данных системой СДПП показан на рис. 6.

Результаты проведенных экспериментов сведены в таблицу 1.

Проведенный натурный эксперимент на станции «Лиски» показал, что первая модель электрической инфраструктуры станции дает более достоверные результаты о параметрах аварийного режима при коротком замыкании. Это видно из таблицы 1. Сравнение происходило по индуктивной составляющей петли КЗ.

Создание более адекватной модели, отражающей процессы, происходящие на крупной железнодорожной станции при КЗ, является важным шагом к решению задачи диагностики и обнаружения поврежденной секции. Ведется дальнейшая разработка данной темы.

Заруцкая Татьяна Алексеевна – родилась в 1975 году. В 1997 году окончила Ростовский государственный университет путей сообщения по специальности «Электроснабжение железнодорожного транспорта». Кандидат технических наук. В 2004 году защитила диссертацию по теме: «Исследование эффективности применения сверхпроводникового индуктивного накопителя энергии на тяговой подстанции постоянного тока». Опыт работы – 15 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры «Автоматизированные системы электроснабжения» ФГБОУ ВПО «Ростовского государственного университета путей сообщения». Имеет 35 научных работ, из них 1 патент.

Таблица 1. Параметры коротких замыканий.

Путь	Экспериментальные данные с СДПП					Высокоточная модель, индуктивное сопротивление, Ом	Обычная модель, индуктивное сопротивление, Ом
	Ток, А	Напряжение, кВ	Полное сопротивление, Ом	Активное сопротивление, Ом	Индуктивное сопротивление, Ом		
4	6005	10,49	1,75	1,34	1,12	1,17	4,40
5	9617	13,04	1,36	0,80	1,09	1,16	3,85
9	6999	10,53	1,50	0,96	1,16	1,22	2,25

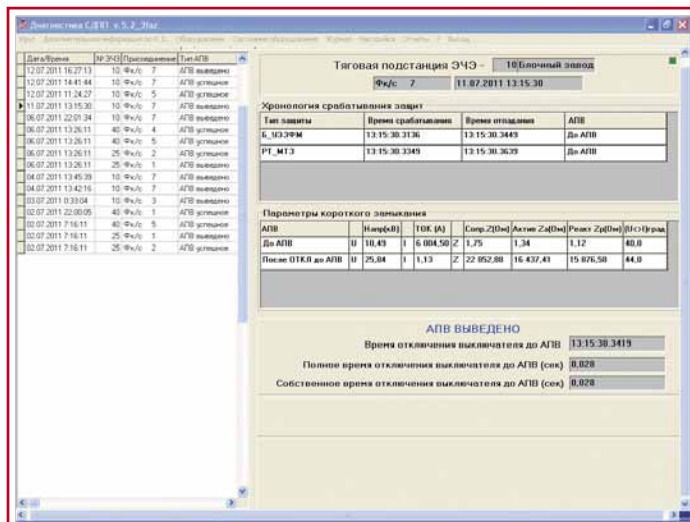


Рис. 6. Результаты испытаний зафиксированные СДПП.

Камардин Олег Владимирович – родился в 1975 году. В 1988 году окончил Ростовский институт инженеров железнодорожного транспорта по специальности «Электрификация железнодорожного транспорта». Опыт работы – 25 лет. В настоящее время работает начальником службы «Электрификации и электроснабжения» Юго-Восточной дирекции инфраструктуры – структурного подразделения центральной дирекции инфраструктуры – филиала ОАО «РЖД». Имеет 2 научных труда.

Триллер Антон Александрович – родился в 1987 году. В 2009 году окончил ФГБОУ ВПО «Ростовского государственного университета путей сообщения» по специальности «Электроснабжение железных дорог». В настоящее время работает по специальности инженером в ООО «ЭнергоСпецПроект» и учится в аспирантуре РГУПС. Имеет 8 научных трудов.

Zarutskaya Tatiana – was born in 1975. In 1997 she graduated from Rostovskiy State Railroad University specializing in «Electric supply of railroads». She is a candidate of Engineering. In 2004 she defended a thesis on the topic: «Investigation of application efficiency of superconductor inductive energy storage unit on the railroad substation of direct current.» She has 15 years of experience. Currently she works as docent at the department «Power supply automation systems» in FGBOU VPO of Rostovskiy State Railroad University. She has 35 scientific works, 1 patent.

Kamardin Oleg – was born in 1975. In 1988 he graduated from Rostovskiy Railroad Transport Engineer Institute specializing in «Electrification of railroad transport». His work experience is 25 years. At present he works as head of the department «Electrification and electrical supply» of the South-East infrastructure management – structural division of the central infrastructure management – affiliate JSC «RZD». He has 2 scientific works.

Triller Anton – was born in 1987. In 2009 he graduated from FGBOU VPO of «Rostovskiy State Railroad University» specializing in «Electric supply of railroads». At present he works as engineer in «EnergoSpecProekt» LCC. He is also a post-graduate student in RGUPS. He has 8 scientific works.

Перечень статей, напечатанных в журнале «Электроника и электрооборудование транспорта» в 2013 году

№ п/п	Название раздела, статьи	Авторы	№ журнала	Стр.
Раздел: ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОНИКИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ НА ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВАХ				
1	Современное состояние и перспектива развития ОАО «Электропривод»	Вишневский С.Н., Конышев Д.В.	3	2-4
Раздел: ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ, ДИАГНОСТИКИ, СВЯЗИ				
2	Применение искусственных нейронных сетей для построения адаптивных регуляторов ДВС	Хрящёв Ю. Е., Епанешников Д.А.	1	2-5
3	Моделирование электронной системы регулирования скорости движения легкового автомобиля в режимах поддержания и ограничения скорости	Дебелов В.В., Иванов В.В., Козловский В.Н., Строганов В.И.	6	2-7
Раздел: ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ				
4	Современные устройства автоматизации электроснабжения тяговой сети переменного тока	Герман Л.А., Герман В.Л., Саморуков А.В., Попов А.Ю., Попов Д.С.	1	6-12
5	Электроэнергетическая совместимость агрегатов современного бортового электроэнергетического комплекса. Нестационарные возмущения и устройства – медиаторы	Коняхин С.Ф.	1	13-19
6	Машины переменного тока	Цыкунов Ю.Ю.	1	20-22
7	Закон оптимального управления электроподвижным составом с реостатно-контакторной системой управления	Колбасинский Д.В., Кнауф Л.В., Новиков Е.А.	1	23-26
8	Электродинамическое моделирование влияния токопроводящего покрытия на диаграммы направленности антенн устройств мониторинга ЛЭП	Антонов А.С., Султан-Заде Т.Т., Шкляев А.А.	1	27-30
9	Критерии оптимальности и примеры синтеза структуры комбинированной системы электроснабжения переменного тока для перспективных летательных аппаратов с полностью электрифицированным оборудованием	Коняхин С.Ф., Резников С.Б., Бочаров В.В., Сыроежкин Е.В., Харченко И.А.	2	2-10
10	Эффективная схема управления системой охлаждения автомобильного двигателя	Сарбаев В.И., Гармаш Ю.В.	2	11-13
11	Оценивание режимов тягового электроснабжения для управления напряжением и реактивной мощностью	Герман Л.А., Бакеев Е.Е., Кишкурно К.В.	2	14-18
12	Электродинамическое моделирование влияния расположения антенн на диаграммы направленности	Антонов А.С., Султан-Заде Т.Т., Шкляев А.А.	2	19-22
13	Синхронизация измерений в системе мониторинга воздушных ЛЭП	Самарин А.В., Масалов В. В.	2	23-26
14	Режим движения поезда на участке с ограничениями скорости	Феоктистов В.П., Паршин А.Н., Раюмов А.Х.	2	27-30
15	Электромеханизмы и электродвигатели разработки ОАО «Электропривод»	Овечкин О.И., Миронов В.А.	3	5-11

16	Применение полевых математических моделей для проектирования оптимальных обмоток вентильных электродвигателей	Власов А.И., Волокитина Е.В., Опалев Ю.Г.	3	12-15
17	Исследования по созданию системы генерирования и запуска маршевого двигателя в концепции полностью электрифицированного самолета. Часть II	Волокитина Е.В.	3	16-22
18	Исследование магнитной системы высокоскоростных бесконтактных электродвигателей постоянного тока	Власов А.И., Волокитина Е.В., Малюгин А.А., Опалев Ю.Г.	3	23-26
19	Оценка эффективности внедрения многофункционального вольтодобавочного трансформатора для повышения напряжения в тяговой сети	Косарев А.Б., Сербиненко Д.В., Алексеев М.В.	4	2-6
20	Новое устройство для диагностики главной изоляции трансформаторов 6-10 кВ системы продольного электроснабжения железных дорог	Серебряков А.С., Семенов Д.А.	4	7-11
21	Анализ пространственно-временной структуры напряженного состояния сгоревшего угля при воздействии квазиточечных импульсных источников нагружения	Ким К.К., Шпилев М.А.	4	12-17
22	Электрические процессы в аккумуляторных и конденсаторных пусковых устройствах при пуске автомобильных двигателей	Яковлев В.Ф.	4	18-22
23	Влияние случайных сигналов на работу электроусилителя рулевого управления	Доманов А.В., Доманов В.И., Сергеев А.В.	4	23-25
24	Анализ эффективности бесконтактных генераторов постоянного тока для транспортных средств	Лохнин В.В., Ширков В.И.	4	26-28
25	Параметрический синтез систем возбуждения генераторов судовых электростанций	Саушев А.В.	4	29-33
26	Применение метода конструктивно-функциональной близости для разработки системы автоматического управления первичным двигателем судовой электростанции	Малышев Ю.С., Сугаков В.Г., Федоров О.В.	4	34-38
27	Компенсация реактивной мощности на электроподвижном составе переменного тока	Евстафьев А.М., Сычуглов А.Н.	4	39-44
28	Внешние характеристики системы «синхронный генератор выпрямитель» автономного транспортного средства	Иньков Ю.М., Фадейкин Т.Н., Бредихина Я.А.	5	2-4
29	К исследованию тракта передачи сигналов с пути на локомотив	Бестемьянов П.Ф., Захаров Д.П.	5	5-10
30	Развитие систем технического зрения на железнодорожном транспорте	Михайлов В.В., Овчаров И.В.	5	11-13
31	Выбор закона распределения случайных параметров колесно-моторных блоков для моделирования электромагнитных процессов в силовой схеме электровоза	Алексеев А.С.	5	14-16
32	Теоретическое обоснование эффективности использования накопителей энергии неуправляемого типа в системе тягового электроснабжения метрополитена	Гречишников В.А., Шевлюгин М.В.	5	17-19
33	Контроль параметров контура коммутации регуляторов тока тяговых электродвигателей вагонов метрополитена	Рябцев Г.Г., Семёнов И.В., Желтов К.С.	5	20-22
34	Система автоматического управления скоростью движения электропоездов метрополитена с асинхронными тяговыми двигателями для города Янгон	Пудовиков О.Е., Муров С.А., Аунг Зо Тун	5	23-25
35	Эффективность регулирования напряжения трансформатора тяговой подстанции переменного тока	Кишкурно К.В., Герман Л.А.	5	26-30
36	Установка поперечной емкостной компенсации с трехэтапным включением	Серебряков А.С., Дулепов Д.Е.	5	31-33
37	Расчет параметров входного фильтра при импульсном регулировании тяговых двигателей на электроподвижном составе постоянного тока	Корнев А.С., Богдан А.А.	5	34-36
38	Развитие конструкции автомобильных генераторных установок и мотор-генераторов	Набоких В.А., Нигматуллин Ш.М.	6	8-9

39	Перспективные направления развития зарядных станций для электромобилей	Ютт В.Е., Оспанбеков Б.К.	6	10-12
40	Электрические процессы в выпрямительных пусковых устройствах при пуске автомобильных двигателей	Яковлев В.Ф.	6	13-16
41	Идеальный выключатель постоянного тока	Пупынин В.Н., Мартюкова В.А.	6	17-20
42	Влияние режима работы подвижного состава метрополитена на его энергетические показатели	Логонова Е.Ю., Коваленко А.В.	6	21-24
43	Пути оптимизации подсистемы управления электрическими аппаратами электроподвижного состава	Опарина Е.В.	6	25-28

Раздел: МЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ, ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

44	Особенности программного обеспечения для расчета универсальной модели тепловой схемы замещения коллекторных и асинхронных тяговых электродвигателей	Платов Н.А., Минаев Б.Н.	1	31-35
45	Анализ работы вентильного двигателя автономных объектов	Доманов В.И., Доманов А.В., Мишин Н.В., Сергеев А.В.	1	36-39
46	Применение тестовых кодов для обнаружения сбоев в исполнительных механизмах при кодоимпульсном управлении	Люминарская Е.С., Дианов В.Н.	2	31-34
47	Регулирование асинхронного двигателя изменением напряжения на статоре	Доманов В.И., Доманов А. В., Муллин И.Ю., Холявко А.О.	2	35-37
48	Сравнительное исследование скалярного и векторного способов управления гребным электродвигателем	Калинин И.М., Махонин С.В., Титов В.В.	2	38-44
49	Электропривод в системах уборки-выпуска и управления взлетно-посадочных устройств	Ерохин Д.В., Волокитина Е.В., Рубцова Л.А.	3	27-29
50	Электропривод реверсивного устройства для перспективных двухконтурных турбореактивных авиационных двигателей	Волокитина Е.В., Тебеньков Ф.Г.	3	30-33
51	Разработка высокоскоростного электропривода компрессора системы кондиционирования воздуха самолета	Волокитина Е.В., Власов А.И., Копчак А.Л., Москвин Е.В., Тебеньков Ф.Г.	3	34-39
52	Испытательный комплекс для высокоскоростного электропривода компрессора системы кондиционирования воздуха	Волокитина Е.В., Ерохин Д.В., Москвин Е.В., Вшивцев М.В.	3	40-43
53	Автоматизированное проектирование электромеханических тормозов авиационного электропривода	Власов А.И., Никитин В.В.	3	44-47
54	Системы электрозапуска газотурбинных двигателей ОАО «Электропривод»	Миронов В.А., Новоселова А.В., Шалагинов В.Ф.	4	45-47
55	Физическое моделирование тягового и вспомогательного электроприводов локомотива с асинхронными двигателями	Космодамианский А.С., Воробьев В.И., Пугачев А.А.	5	37-40
56	Применение метода конечных разностей для определения распределения температуры в изоляции тяговых электрических машин	Дорохина Е.С., Рапопорт О.Л., Хорошко А.А.	6	29-30
57	Компьютерное моделирование электропривода транспортного модуля с линейным асинхронным двигателем	Епифанов Г.А. Мазнев А.С.	6	31-34

Раздел: ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ, ДАТЧИКИ

58	Компьютерное моделирование тиратрона	Пустоветов М.Ю.	1	40-42
59	Оперативные показатели надежности электрооборудования автомобилей	Заятров А.В., Строганов В.И., Козловский В.Н.	1	43-45
60	СБИС класса «система на кристалле» для мониторинга состояния линий электропередач	Лебедев С.В., Флегонтов В.Е., Глазов В.М., Рыгалин Д.Б.	2	46-47

Раздел: ПРОБЛЕМЫ КАЧЕСТВА И НАДЕЖНОСТИ, СЕРТИФИКАЦИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ

61	Оценка соотношения СКЗ радиоимпульса и интервала усреднения	Щербина Е.Г.	5	41-42
62	Комплексный подход к разработке перспективного показателя надёжности электрооборудования автомобиля	Зятров А.В.	6	35-37

Раздел: ДИАГНОСТИКА И ИСПЫТАНИЯ

63	Методы определения форсированных режимов испытаний тяговых электрических машин электроподвижного состава	Глуценко М.Д.	6	38-40
64	Создание высокоточной модели инфраструктуры крупной железнодорожной станции для диагностики и дистанционного определения места короткого замыкания	Заруцкая Т.А., Камардин О.В. Триллер А.А.	6	41-44

Раздел: ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

65	Освоение в тяговом электроснабжении электрооборудования на основе высокотемпературной сверхпроводимости и его электромагнитная совместимость	Бадёр М.П.	5	43-47
----	--	------------	---	-------

Раздел: ИНФОРМАЦИЯ

66	Перечень статей, напечатанных в журнале «Электроника и электрооборудование транспорта» в 2012 году		1	46-47
67	Перечень статей, напечатанных в журнале «Электроника и электрооборудование транспорта» в 2013 году		6	45-47

Сведения об авторах

**Дебелов Владимир
Валентинович**
8-917-132-85-87

**к.т.н., профессор
Набоких Владимир Андреевич**
8-905-730-79-37

**д.т.н., профессор
Ютт Владимир Евсеевич**
8-499-155-04-20

**к.т.н.
Яковлев Вадим Фридрихович**
8-960-832-01-38

**д.т.н., профессор
Пупынин Владимир Николаевич**
8-495-684-22-40

**д.т.н., профессор
Логинова Елена Юрьевна**
8-915-439-13-74

**Опарина Екатерина
Владимировна**
8-911-843-22-32

Дорохина Екатерина Сергеевна
8-913-845-03-39

Епифанов Григорий Алексеевич
8-911-999-44-79

Заятров Алексей Викторович
8-927-784-28-47

**д.т.н.
Глуценко Михаил Дмитриевич**
8-916-496-71-85

**к.т.н.
Заруцкая Татьяна Алексеевна**
8-928-100-76-27

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) – 4 800 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 2014 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.