

В. Н. БЕЗРУЧЕНКО, О. И. ГИЛЕВИЧ, А. Н. МУХА, А. В. ШАПОВАЛОВ (ДИИТ)

## О ВОЗМОЖНОСТИ МОДЕРНИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОВОЗОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С КОЛЛЕКТОРНЫМИ ТЯГОВЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

Розглянуто питання введення нового режиму роботи тягових колекторних електродвигунів і застосування статичних перетворювачів з метою підвищення енергетичних показників електровозів змінного струму.

Рассмотрены вопросы введения нового режима работы тяговых коллекторных электродвигателей и применения статических преобразователей с целью повышения энергетических показателей электровозов переменного тока.

The article considers issues of introducing new modes of traction collector electric motors operation and application of static converters with the purpose of improving the power performances of a.c. electric locomotives.

Программой развития железнодорожного транспорта [1; 2] предусматривается пополнение парка электровозов переменного тока для грузовых и пассажирских перевозок. Взамен электровозов ВЛ80Т, ВЛ80С, поставляемых Россией, и электровозов ЧС4, ЧС8, поставляемых заводами «Шкода», предполагается поставка электровозов, производимых предприятиями Украины. Это должно обеспечить независимость железных дорог Украины от зарубежных поставок, снижение цены локомотивов, создание рабочих мест на предприятиях Украины.

По решению Укрзалізничниці в настоящее время силами Львовского и Запорожского электровозоремонтных заводов осуществляется изготовление четырехосных пассажирских электровозов ВЛ40У путем модернизации электровозов ВЛ80Т по проекту ОАО «ВЭЛНИИ» (Россия) [3]. Холдинговой компанией «Лугансктепловоз» предлагается изготовление украинского восьмиосного электровоза переменного тока напряжения 25кВ, частотой 50 Гц. За основу этого предложения принят электропривод электровоза ВЛ85, построенный на тиристорных выпрямительно-инверторных установках и коллекторных тяговых двигателях постоянного тока с четырехзонным импульсно-фазовым регулированием напряжения.

Поскольку новым электровозам предстоит находиться в эксплуатации 30 лет, их конструкция должна соответствовать перспективным направлениям развития тягового электроподвижного состава (ЭПС) на этот период.

Современные тенденции развития ЭПС связаны с внедрением асинхронного электропривода (АТЭП). Однако, как показывает опыт зарубежного и отечественного электровозострое-

ния, электровозы с асинхронными тяговыми двигателями (АТД) имеют очень высокую стоимость, причем основную ее часть составляют автономные трехфазные инверторы напряжения (АТИН) и система управления асинхронного электропривода.

Например, на электровозе ДСЗ стоимость трехфазных инверторов составляет 15 % от стоимости всего электровоза. Кроме того, поскольку АТД наиболее эффективен при высоких значениях частоты вращения, создание АТЭП сопряжено с решением значительного объема проблем создания и эксплуатации высокоскоростной тяговой передачи.

Система управления АТЭП требует сложного оборудования и методик для ее настройки при эксплуатационном ремонте, что усиливает зависимость локомотивного хозяйства от поставщиков электронного преобразовательного оборудования.

Перечисленные факторы позволяют сделать вывод, что АТЭП целесообразно применять для высокоскоростного пассажирского ЭПС.

ЭПС для грузового и пригородного пассажирского движения, со скоростями до 120 км/час целесообразно выполнять на основе коллекторных тяговых электродвигателях (КТЭД) с двухсторонней тяговой передачей, которая обеспечивает более благоприятные квазистатические режимы по сравнению с односторонней при реализации больших тяговых усилий на ободе колеса.

В связи с повышением стоимости электроэнергии важнейшее значение приобретают энергетические характеристики ТЭП.

Тяговый привод электровоза ВЛ85 имеет весьма низкое (до 0,8) значение коэффициента

мощности, что обусловлено применением тиристорного межзонного импульсно-фазового регулирования напряжения.

Снижение уровня потребления реактивной мощности достигается применением входных четырехквadrантных преобразователей, обеспечивающих работу ТЭП с коэффициентом мощности близким к единице. Такой преобразователь для электровозов переменного тока позволяет обеспечить также переход ТЭП из режима тяги в режим рекуперации с инвертированием напряжения постоянного тока КТЭД и возврат энергии в контактную сеть.

Регулирование напряжения на КТЭД может осуществляться полупроводниковым ключом с широтно-импульсным регулированием (ШИР) при высокой (до 450 Гц) частоте. Схема такого ТЭП представлена на рисунке.

Входной преобразователь для электровозов постоянного тока напряжением 3 кВ может быть выполнен на тех же элементах, что и для электровозов переменного тока. При этом упрощается построение электровоза двойного питания.

Система управления и регулирования ТЭП с КТЭД постоянного тока значительно проще, чем для АД, менее критична и разница диаметров колесных пар электропривода. ТЭП с КТЭД постоянного тока обладает большей динамической устойчивостью при различных возмущающих воздействиях, особенно по моменту сопротивления на осях колесных пар и по проскальзыванию колес, что особенно важно для грузовых электровозов, движущихся по путям, как правило, невысокой балльности.

Возможность отделения ТЭД от контактной сети с помощью ШИР на электровозах постоянного тока напряжением 3 кВ позволяет строить их ТЭП с независимым возбуждением ТЭД и индивидуальным регулированием возбуждения на каждой оси.

Наличие преобразователя между контактной сетью и тяговым двигателем при наличии автоматического регулирования напряжения на промежуточном звене постоянного тока обеспечивает более мягкие, по динамике напряжения в контактной сети, условия работы КТЭД, что повысит его коммутационную устойчивость. Кроме того, это позволяет иметь постоянное параллельное соединение ТЭД, что повышает реализуемый коэффициент сцепления.

Наряду с этим современные тенденции совершенствования конструкции, технологии изготовления, качества применяемых материалов

создают предпосылки к повышению качества и увеличению долговечности КТЭД.

Повышение мощности ТЭД одну ось определяется при заданной скорости значением реализуемой по условиям сцепления колеса с рельсом касательной силы тяги на ободу колеса. Исследованиями ДИИТа [4] установлено, что при скорости движения до 120 км/час необходима мощность ТЭД 1000 кВт. При фактическом распределении весовых норм поездов и при реализуемых значениях коэффициента сцепления необходимая, на одну ось, мощность ТЭД должна быть 800-900 кВт, что реализуется на базе КТЭД. При этом целесообразна организация движения на базе кратной тяги четырехосными электровозами. Номинальную мощность ТЭД целесообразно выбирать с учетом их перегрузочной способности.

При оценке необходимой номинальной мощности тягового двигателя целесообразно учесть особенности эксплуатации локомотивов на железных дорогах Украины, которые требуют введения еще одного номинального режима тягового двигателя – режима S2 продолжительностью 30 минут. Как показывают расчеты, например, для тягового двигателя НБ514 это должно позволить при сохранении номинального значения тока  $I_{ном} = 843$  А в режиме 30 минут уменьшить сечение проводников обмотки якоря и в конечном итоге, сократить длину якоря и массу тягового электродвигателя. Оценим возможности, которые дает введение режима S2 продолжительностью 30 минут.

В ТЭД НБ514 в якоре применена изоляция класса F, а его конечный перегрев составляет  $\tau_{кн} = 135$  °С.

Как известно [5], коэффициент термической перегрузки двигателя есть отношение суммы потерь в кратковременном режиме к сумме потерь в длительном номинальном режиме.

При модернизации двигателя ставится задача сохранить индукцию в зубцах якоря, т. е. оставить неизменными потери в стали. В этих условиях коэффициент термической перегрузки получает вид

$$K_{терм} = \left( \frac{I_{кр}}{I_{ном}} \right)^2 \frac{q}{q'}$$

где  $I_{кр}$  и  $I_{ном}$  – соответственно кратковременный и номинальный (длительный) токи,  $q$  и  $q'$  – соответственно существующее и предлагаемое сечение проводника обмотки якоря.

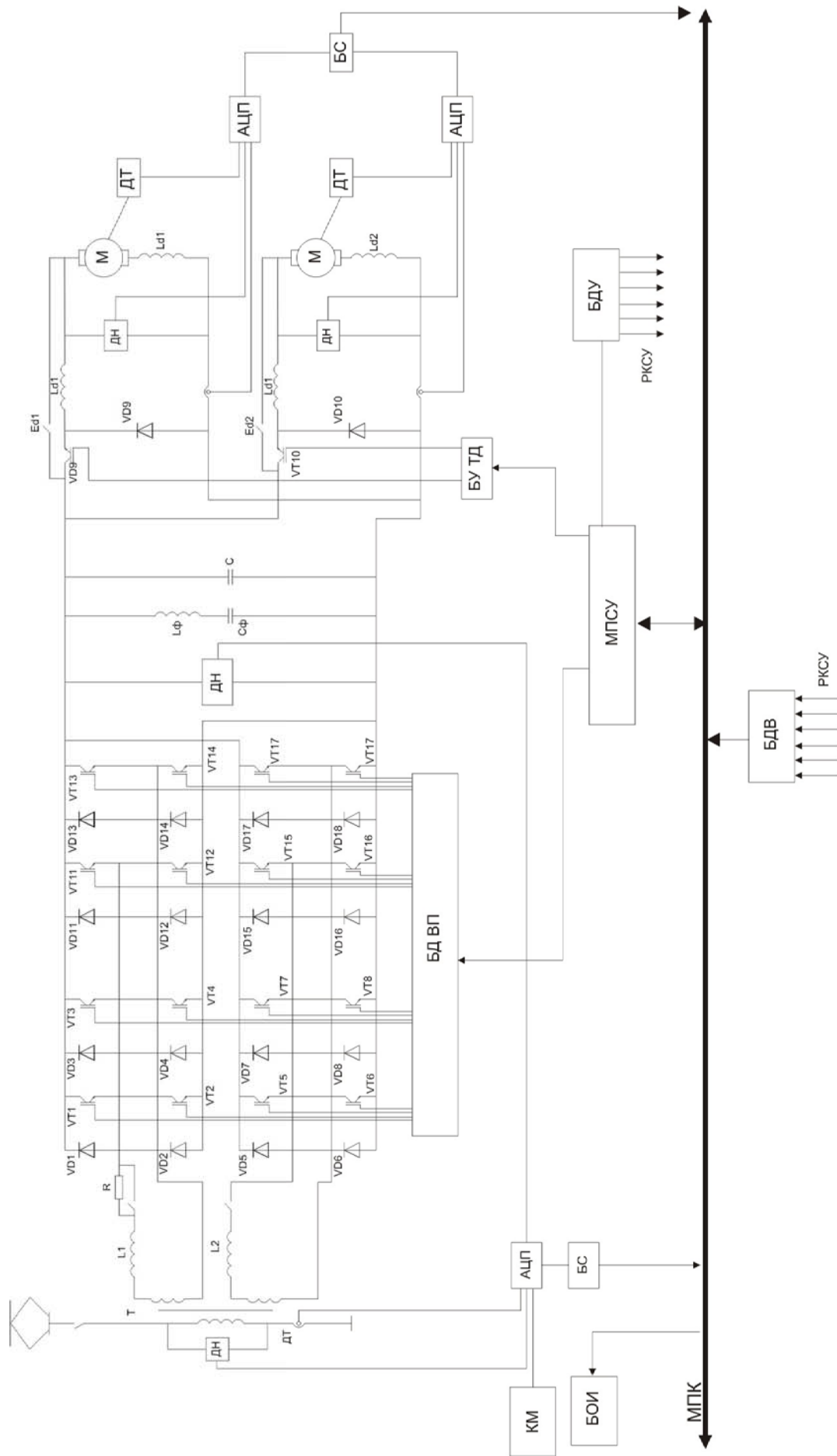


Рис. Структурная схема микропроцессорной системы автоматического регулирования:

КМ – контроллер машиниста; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; МПК – мультиплексированный последовательный канал; БС – блок сопряжения; БОИ – блок отображения информации; БДВП – блок драйверов широтно-импульсного регулятора; МПСУ – микропроцессорная система управления; БДВ – блок дискретного ввода; БДУ – блок управления тяговыми двигателями; ДН и ДТ – датчики напряжения и тока

При сохранении номинального значения тока, ширина лежащего плашмя в пазу проводника якоря 7,1 мм заменяется на 5 мм. Расчеты, выполненные согласно [6], показывают, что конечный перегрев составит:

$$\tau'_{\text{кн}} = \tau_{\text{кн}} \cdot K_{\text{терм}} = 135 \cdot \frac{7,1}{5,0} \approx 192 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Принимаем начальный перегрев  $\tau_0 = 100 \text{ } ^\circ\text{C}$ , получим в 30-минутном режиме перегрев  $\tau_{30} = 138 \text{ } ^\circ\text{C}$ , что позволяет сохранить изоляцию класса F.

Сокращение ширины паза и расширение зубца позволит, как показывают расчеты, уменьшить длину пакета якоря 385...330 мм, а масса двигателя уменьшится на 385 кг. Мощность длительного режима при этом уменьшится на 17 %.

Дальнейший анализ позволил установить, что при такой модернизации двигателя его нынешний часовой режим может быть преобразован в 30-минутный. Двигатель НБ514 с новым сечением проводников якоря может быть нагружен током часового режима  $I_{\text{час}} = 905 \text{ А}$  в течение 30 минут при перегреве не более  $\tau_{30} \leq 150 \text{ } ^\circ\text{C}$ , что, естественно, предполагает применение в якоре изоляции класса Н.

Модернизация электровозов должна реализовываться с одновременным внедрением интегральных микропроцессорных систем управления и диагностирования на ЭПС. Структурная САР тягового электропривода представлена на рисунке.

Оснащение электровозов микропроцессорными системами управления с автоматическим регулированием параметров обеспечит экономное вождение поездов в широком диапазоне весовых норм.

Произведем предварительный расчет режимов работы и выбор элементной базы входного статического преобразователя и регулировочного ключевого элемента КТЭД.

Поскольку частота работы регулировочного ключа КТЭД сравнительно невелика (до 450 Гц) в качестве ключа возможно применение IGCT либо IGBT элементов. Как исходные принимаем следующие параметры:  $I_{\text{ключ}} = 905 \text{ А}$ ,  $U_{\text{обр. ключ}} = 1500 \text{ В}$ .

Одиночные ключи с требуемыми параметрами выпускает фирма АВВ (Интернет сайт [www.abb.com](http://www.abb.com)). Принимая перегрузочную способность по току и напряжению не менее 50 %, в качестве ключа можно предложить применение IGBT транзистора типа 5SNA 1500E330100 фирмы АВВ с током стока 1500 А, напряжением затвор-исток 3300 В, в одиночном исполнении.

В качестве элементной базы представленного на рисунке четырехквadrантного преобразователя целесообразным является применение готовых модулей IGBT транзисторов со встроенными обратными диодами.

Действующее напряжение на вторичной обмотке тягового трансформатора Т (см. рисунок) составляет [7]

$$U_2 = \frac{1500}{1,3 \cdot \sqrt{2}} = 815 \text{ В}.$$

Принимая КПД 4QS преобразователя равным 0,97, получим действующий ток вторичной обмотки

$$I_2 = \frac{P_{\text{КТЭД}}}{\eta_{4\text{QS}} \cdot U_2} = \frac{1000 \cdot 10^3}{0,97 \cdot 815} = 1265 \text{ А}.$$

Средний ток транзистора и диода одного плеча четырехквadrантного преобразователя

$$I_{\text{ср}} = \frac{\sqrt{2} \cdot I_2}{\pi} = \frac{\sqrt{2} \cdot 1265}{\pi} = 570 \text{ А}.$$

Мощность преобразователя при  $\cos \varphi = 0,95$  составит

$$P_{4\text{QS}} = U_2 \cdot I_{\text{ср}} \cdot \cos \varphi \cdot \eta_{4\text{QS}} = 428 \text{ кВт}.$$

Обратное напряжение на одном ключе составляет

$$U_{\text{обр}} = U_2 \cdot \sqrt{2} = 815 \cdot \sqrt{2} = 1150 \text{ В}.$$

Емкость фильтрового конденсатора при коэффициенте пульсаций выпрямленного тока  $k_{\text{п}} = 1,25$  и допустимой пульсации напряжения на конденсаторе  $\Delta U_{\text{с(max)}} = 5 \text{ %}$  равна

$$C = \frac{k_{\text{п}} \cdot I_{\text{ключ}}}{628 \cdot \Delta U_{\text{с(max)}}} = \frac{1,25 \cdot 905}{628 \cdot 0,05 \cdot 1500} = 0,024 \text{ Ф}.$$

Модули для однофазного четырехквadrантного преобразователя с требуемыми параметрами выпускает фирма Semikron (Интернет сайт [www.semikron.com](http://www.semikron.com)).

Принимая перегрузочную способность по току и напряжению приблизительно 50 %, в качестве ключа можно предложить применение IGBT транзистора типа SKM 800GA176D фирмы Semikron с током стока 830 А, напряжением затвор-исток 1700 В, в одиночном исполнении с обратным диодом.

С точки зрения энергетических показателей, в частности, коэффициента мощности, применение статических преобразователей на полностью управляемых вентилях с широтно-

импульсной модуляцией, позволяет применить в составе тягового привода так называемые активные фильтры [7].

Активные фильтры представляют собой источники напряжения или тока с управляемым искажением, которые вырабатывают в противофазе разность мгновенного значения кривой напряжения (тока) сети и ее первой гармоники.

Применение активных фильтров теоретически может позволить получить cos $\phi$  близкий к единице.

### Выводы

1. Тяговый двигатель электровоза переменного тока может допустить работу в 30-минутном режиме с реализацией мощности, традиционно определяемой часовой с одновременным существенным сокращением массы.

2. Для регулирования мощности электровозов переменного тока с коллекторными ТЭД целесообразно применение четырехквadrантного преобразователя напряжения с ШИР напряжения.

3. Для обеспечения выпуска отечественного электровоза переменного тока с высокими энергетическими показателями, требуется освоение выпуска предприятиями Украины современных преобразователей на полностью управляемых силовых полупроводниковых ключах.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.

1. Воскрешают локомотивы // Весь транспорт, – 2004, – № 5, 6. – С. 14–17.
2. Мукминова Т. А. Прогрес залізничного транспорту визначається характеристиками тягового рухомого складу // Залізничний транспорт України, – 2004, – № 5, – С. 31–34.
3. Орлов Ю. А. Пассажирский четырехосный электровоз для железных дорог Украины / Ю. А. Орлов, В. П. Янов // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля., – 2003, – № 8(78). – С. 137–142.
4. Гетьман Г. К. Определение рационального мощностного ряда грузовых электровозов для железных дорог Украины // Залізничний транспорт України, – 2002, – № 6, – С. 29–34.
5. Чиликин М. Г. Основы автоматизированного электропривода / М. Г. Чиликин, А. С. Сандлер. – М.: Энергия, 1974. – 567 с.
6. Безрученко В. М. Тягові електричні машини електрорухомого складу / В. М. Безрученко, В. К. Варченко, В. В. Чумак. – Д.: Вид-во Дніпр. нац. ун-ту. зал. тр-ту, 2003. – 252 с.
7. Зиновьев Г. С. Основы силовой электроники. – Новосибирск. Из-во НГТУ, 1999, Ч. 1. – 199 с., 2000, Ч. 2. – 197 с.

Поступила в редколлегию 14.06.2006.