

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

На правах рукописи

БЕН МУСТАФА РИАД БЕН АМОР
(Тунис)



ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ С
УЛУЧШЕННЫМИ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИМИ
ПОКАЗАТЕЛЯМИ ДЛЯ РЕГУЛИРУЕМОГО
ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Специальность: 05.09.12 - "Полупроводниковые преобразователи
электроэнергии"

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Киев-1997

АВ 37.094

Диссертацией является рукопись.

Работа выполнена на кафедре теоретических основ электротехники Национального технического университета Украины "Киевского политехнического института".

Научный руководитель - лауреат Государственной премии Украины, академик МАН, доктор технических наук, профессор
Виталий Иванович Сенько

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор
Владимир Николаевич Исаков;
кандидат технических наук, доцент
Юрий Евгеньевич Кулешов

Ведущая организация - Харьковская Государственная академия железнодорожного транспорта,
Министерство транспорта Украины

Защита состоится " 26 " 03 1997г. в 11⁰⁰ часов на заседании специализированного ученого совета Д01.98.02 при Институте электродинамики НАН Украины по адресу: 252680, Киев-57, пр. Победы, 56.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан " _____ " _____ 1997г.

Ученый секретарь
специализированного ученого
совета

В.С.Федий

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00751731 (0)

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы и степень исследования тематики диссертации. Рост пригородных и междугородных железнодорожных пассажирских перевозок невозможен без создания надежных и высокоэффективных электропоездов.

Для выполнения задачи по полному удовлетворению народного хозяйства в перевозках необходимо техническое перевооружение железнодорожного транспорта. Одним из возможных путей, обеспечивающих в наибольшей степени повышение эффективности электроподвижного состава (ЭПС), является применение на нем тяговых асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, поскольку коллекторные двигатели постоянного тока в качестве тяговых на электроподвижном составе уже исчерпали свои возможности по мощности и требуют значительных эксплуатационных расходов при использовании их в качестве исполнительных во вспомогательных электроприводах.

В настоящее время во всех развитых в транспортном отношении странах ведутся интенсивные работы по созданию электропоездов, локомотивов и других подвижных единиц с асинхронными тяговыми двигателями. Успехи в области силовой и информационной электроники позволили сделать новый шаг в решении проблем создания тягового подвижного состава с асинхронными тяговыми двигателями.

Дальнейшее совершенствование электрооборудования ЭПС является важнейшим условием повышения ее технико-экономических показателей. Одним из наиболее перспективных направлений является внедрение на ЭПС преобразовательных устройств. В настоящее время на ЭПС переменного тока применяются преобразовательные системы на основе выпрямительных установок. Они характеризуются различными энергетическими показателями и отличаются друг от друга степенью сложности силовых цепей.

Одним из основных параметров, определяющих эффективность ЭПС, является коэффициент мощности. При низких коэффициентах мощности увеличивается потребление реактивной мощности, нагрузка линий электропередач реактивным током, увеличение потерь напряжения и общее снижение энергетических показателей системы электроснабжения.

Наиболее простой схемой является схема преобразова-

ДНБ им. В. Стефаника
АН Украины

тельной установки с зонно-фазовым регулированием выходного напряжения, однако этой схеме свойственны низкие энергетические показатели, особенно при глубоком регулировании выходного напряжения. Увеличение числа зон регулирования для повышения энергетических показателей может быть применено на ЭПС только для грузовых электровозов, длительно работающих при напряжениях на тяговых двигателях меньших номинальных значений. Для электропоездов характерен кратковременный режим пуска, что делает нецелесообразным использование преобразователей с числом зон регулирования более двух.

Существует ряд способов, которые позволяют повысить энергетические показатели системы тяги на переменном токе путем применения устройств продольной и поперечной компенсации реактивной мощности, подключаемых к контактной сети. Однако применение таких устройств для компенсации реактивной мощности при изменяющейся нагрузке требует сложных устройств для регулирования конденсаторов компенсатора. Поэтому, в зависимости от величины нагрузки в контактной сети могут иметь место режимы перекомпенсации или недокомпенсации, что приводит к дополнительным потерям в контактной сети.

Наиболее целесообразным способом повышения энергетических показателей системы электрической тяги на переменном токе является использование устройств регулирования реактивной мощности непосредственно на ЭПС. При размещении регуляторов реактивной мощности (РРМ) на подвижном составе появляется возможность компенсировать реактивную мощность непосредственно у потребителя, что позволяет снизить потери энергии не только в линии электропередач, но и в тяговой сети и в тяговом трансформаторе.

Повышение энергетических показателей подвижного состава за счет применения регуляторов реактивной мощности является одним из перспективных направлений его совершенствования и определяет актуальность выполненного исследования.

Актуальность указанных исследований подтверждается тем, что они выполнялись кафедрой теоретических основ электротехники Национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт" в соответствии с координационным планом НАН Украины по ком-

плексной проблеме "Научные основы электроэнергетики".

Цель и основные задания научного исследования - решение научной задачи исследования и создания входных преобразовательных установок для тягового привода, обладающих улучшенными технико-экономическими показателями во всем диапазоне регулирования напряжения.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие основные задачи:

- анализ режимов работы электропривода, определяющих требования к регулятору реактивной мощности;
- исследование электромагнитных процессов в электроприводе, позволяющие оценить влияние основных параметров привода и контактной сети на параметры регулятора реактивной мощности и энергетические показатели преобразовательной установки;
- разработка методики определения параметров элементов регулятора реактивной мощности, а также составляющих мощности на входе преобразовательной установки;
- развитие теории двухтактной ШИМ 1-го рода на основании математического аппарата двойного ряда Фурье;
- исследование процессов в четырехквadrантном преобразователе, позволившее производить расчет токов, напряжений и коэффициента мощности электроподвижного состава с автономными инверторами напряжения.

Объект и предмет исследования. Исследуются полупроводниковые входные преобразователи электроподвижного состава на предмет повышения их энергетической эффективности.

Методология и методы исследования. Для решения сформулированных задач использовались следующие методы анализа электрических цепей: основной гармоник, мгновенных значений, гармонического анализа и математический аппарат двойного ряда Фурье. Применение этих методов в сочетании с методом математического моделирования на ЭВМ позволило решить в комплексе задачу исследования электромагнитных процессов в системе тягового электропривода с преобразовательной установкой, начиная с выбора параметров элементов РРМ и заканчивая определением интегральных характеристик. При этом для ориентировочной оценки параметров элементов РРМ и использования их в математической модели

применялся метод основной гармоника, что дало возможность получить соотношения между параметрами элементов и режимами работы тягового электропривода, удобные для проведения анализа в общем виде.

Научная новизна работы заключена в следующем:

1. На основе анализа режимов движения пригородных электропоездов выявлены характерные зоны пуска поезда, в которых необходима компенсация реактивной составляющей потребляемой мощности.

2. Для тягового электропривода поезда с преобразовательной установкой, зонно-фазовым регулированием величины выпрямленного напряжения и регулятором реактивной мощности разработана математическая модель, учитывающая параметры системы электроснабжения переменного тока, тягового трансформатора, силовых полупроводниковых приборов и нагрузки.

3. С использованием математической модели получены характеристики коэффициента мощности на входных зажимах преобразовательной установки во всем диапазоне регулирования выходного напряжения.

4. Установлено влияние регулятора реактивной мощности на продолжительность коммутационного интервала и на изменение гармонического состава тока, потребляемого преобразователем.

5. Для двухзонной тяговой преобразовательной установки аналитически обоснована целесообразность применения двух регуляторов реактивной мощности, которые по соображениям технологичности изготовления следует выполнять в виде последовательных LC-цепей с одинаковыми параметрами элементов.

6. Теоретически обоснован общий подход к анализу напряжений, полученных методом ШИМ, позволяющий с единых методологических позиций при различных модулирующих функциях определять частотный спектр для любой кратности несущей (ω) и модулирующей (ω_m) частот.

7. Получены аналитические выражения, позволяющие производить расчет токов, напряжений и коэффициента мощности электроподвижного состава с четырехквadrантными преобразователями, питающими автономные инверторы напряжения.

Достоверность научных положений, выводов и рекоменда-

ций работы подтверждена экспериментально при лабораторных испытаниях физической модели преобразовательной установки.

Теоретическая и практическая ценность. В результате выполненных теоретических исследований разработана методика определения параметров регулятора реактивной мощности и энергетических показателей на входе преобразовательной установки.

Предложены методы улучшения энергетических показателей на основе полученных характеристик составляющих мощности на входе преобразователя. Методика гармонического анализа состава напряжения с ШИМ при различных модулирующих функциях позволила снизить трудоемкость инженерных расчетов и осуществить рациональный выбор параметров напряжений при любой кратности частот. Основные аналитические напряжения, полученные для четырехквadrантного преобразователя, питающего автономный инвертор напряжения, позволяют определить эффективность его применения на ЭПС с целью повышения мощности не только на токоприемнике, но и всей системы энергоснабжения. Полученные результаты позволяют повысить технико-экономический уровень электропоездов и могут быть использованы при разработке систем электропривода не только для электропоездов, но и в промышленности.

Автор защищает:

1. Принципы построения входных преобразователей статических преобразовательных установок электропоездов переменного тока, обеспечивающих улучшенные энергетические параметры СПУ с тяговыми двигателями.

2. Методику анализа электромагнитных процессов в силовой цепи тягового привода электропоезда.

3. Методику исследования напряжений с двухтактной ШИМ 1-го рода при различных модулирующих функциях, основанную на использовании двойного ряда Фурье.

4. Результаты анализа процессов в четырехквadrантном входном преобразователе, обеспечивающем высокий коэффициент мощности.

Реализация результатов работы. Результаты исследований нашли практическое применение при разработке полупроводниковых преобразователей по договору №152 от 01.07.1994 г. "Разработка преобразователя для питания

вспомогательных цепей низковольтных транспортных средств", выполняемого кафедрой теоретических основ электротехники. Некоторые теоретические и практические результаты, полученные в работе, используются в учебных курсах НТУУ "КПИ" при подготовке специалистов по электроприводу и электромеханике.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались на научных семинарах НАН Украины "Научные основы электроэнергетики".

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 печатных работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов и заключения. Содержит 7 рисунка, 7 таблиц, список литературы из 127 наименований и одно приложение на 2 страницах. Общий объем работы составляет 212 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность темы и сформулирована цель исследования, перечислены основные результаты работы, приведены положения, выносимые на защиту.

В первом разделе приводятся основные технические требования к электропоездам. Проведен анализ режимов и условий работы тягового привода электропоезда переменного тока, из которого сформулированы требования к статической полупроводниковой установке. Предварительно определены энергетические показатели входного преобразователя тягового электропривода электропоездов и рассмотрены способы повышения энергетических показателей статической преобразовательной установки.

Наиболее перспективным мероприятием в техническом совершенствовании электропоездов является применение АТД, ставшим возможным благодаря успехам в силовой и информационной электронике.

Анализ различных структур преобразования электрической энергии электропоездов переменного тока показал, что им присущ ряд специфических особенностей как схемотехнического плана, так и регулировочных возможностей. Тип входного преобразователя определяется типом выходного преобразователя, в качестве которого используют обычно

АИН или АИТ. Выбор варианта структуры преобразователя для привода электропоезда зависит от технико-экономических показателей, состояния и перспектив развития промышленности по производству полупроводниковых приборов, конденсаторов и реакторного оборудования.

В настоящее время на ЭПС однофазно-постоянного тока исключительное распространение получили однофазные мостовые преобразователи, что обусловлено меньшей мощностью их трансформаторов по сравнению с аналогичным параметром выпрямителя с нулевым выводом. Входные преобразователи СПУ, выполненные на основе выпрямителей, могут быть с естественной или принудительной коммутацией.

В выпрямителях с естественной коммутацией осуществляется зонно-фазовое регулирование выходного напряжения.

В настоящее время на электровозах используют четырехзонное регулирование, а на электропоездах достаточно ограничиться двумя зонами, что упрощает конструкцию тягового трансформатора.

Если в качестве выходного преобразователя используется АИН, то в качестве ВИУ широкое применение в мировой практике находит так называемый четырехквadrанный преобразователь.

На стадии выбора числа зон регулирования для выбора параметров преобразователя и приближенных показателей его работы были рассчитаны энергетические показатели многозонного преобразователя. Анализ полученных выражений и построенных кривых показывает, что реактивная мощность обусловлена не только величиной угла управления тиристорами преобразователя, но и длительностью коммутационного интервала γ , которая зависит от тока нагрузки и индуктивных сопротивлений цепи переменного тока. Увеличение продолжительности коммутационных интервалов приводит, с одной стороны, к уменьшению диапазона регулирования, а, с другой, к возрастанию реактивной мощности на входе преобразователя, особенно для 2-зонного преобразователя. С ростом тока нагрузки значения реактивной мощности на входе преобразователя, обусловленной продолжительностью коммутационного интервала, еще больше возрастает.

Жесткость внешней характеристики преобразователя для двухзонного преобразователя, применяющегося на электропое-

ездах, в первой и второй зонах регулирования различна. При прочих равных условиях при работе во второй зоне падение напряжения более чем в четыре раза превышает падение напряжения в первой зоне регулирования. Это может привести к тому, что при переходе во вторую зону регулирования и больших значениях углов управления α_2 вместо ожидаемого повышения напряжения произойдет его снижение. Данное обстоятельство влияет на выбор диапазона изменения угла управления α_2 . Максимальная величина угла α_2 должна быть такой, чтобы коммутация тока с первой зоны на вторую заканчивалась к моменту окончания полупериода напряжения питающей сети, т.е.

$$\alpha_{2\max} \geq \arccos \left(\frac{u_{k3} I_d}{\sqrt{2} I_{2\text{ном}}} - 1 \right).$$

Реактивная мощность достигает максимального значения при $U_{d\alpha}/U_{d0} = 0,25$ в первой зоне, а во второй - при $U_{d\alpha}/U_{d0} = 0,75$. Такое отличие реактивных мощностей в первой и второй зонах регулирования является следствием больших интервалов коммутации во второй зоне регулирования из-за роста индуктивности рассеяния трансформатора. Это приводит к необходимости иметь различные параметры регуляторов реактивной мощности в разных зонах регулирования. В зависимости от зоны регулирования значения коэффициента мощности отличаются от идеализированных (без учета угла коммутации) на $\pm 10\%$ в зависимости от величины тока нагрузки. Поэтому при расчете регуляторов реактивной мощности необходимо учитывать параметры питающей сети.

Полученные зависимости позволяют определить необходимую мощность регуляторов реактивной мощности, необходимых для устранения влияния как сдвига основной гармоники потребляемого тока, так и высших гармонических составляющих (особенно третью и пятую гармоники).

Второй раздел посвящен анализу электромагнитных процессов в двухзонном входном преобразователе с регулятором реактивной мощности с учетом конечных параметров нагрузки и питающей сети при помощи разработанной математической модели и определению на основе результатов этого анализа параметров и энергетических показателей входного преобра-

зователя.

Рост реактивных мощностей на входе преобразователя, связанный с коммутационными процессами и фазовым регулированием напряжения, приводит к увеличению полной мощности и снижению величины коэффициента мощности λ . Повышение коэффициента мощности на входе преобразовательной установки возможно за счет увеличения коэффициента сдвига $\cos \varphi$, так как, в основном, именно его величиной обусловлены низкие значения коэффициента мощности.

Применение источников реактивной мощности, подключенных на входе преобразовательной установки, позволяет повысить значения коэффициента мощности преобразователя, во-первых, за счет уменьшения фазового сдвига между кривыми тока и напряжения в питающей сети, и, во-вторых, за счет устранения в питающей сети высших гармонических составляющих тока.

Полная компенсация реактивной мощности или устранение той или иной гармоники во всем диапазоне регулирования напряжения невозможны, так как значения реактивной мощности даже в пределах одной зоны регулирования меняются. При переходе от одной зоны регулирования к другой происходит скачкообразное изменение мощностей на входе преобразователя. Поэтому, например, для двухзонной преобразовательной установки, рационально иметь, по меньшей мере, два РРМ - каждый для своей зоны регулирования.

Величина емкости конденсаторов в LC -контуре определяется режимами работы преобразователя и тяговой сети, а также массо-габаритными и экономическими показателями, так как увеличение емкости конденсаторов повышает стоимость всей установки. Для снижения уровня высших гармонических составляющих в первичном токе ЭПС, а, следовательно, улучшения его формы, LC -контур настраивается на подавление интенсивных высших гармонических составляющих тока, обусловленных работой преобразователя.

Значения коэффициента искажения в процессе регулирования даже в первой зоне достаточно велики. Это позволяет осуществить выбор параметров регулятора реактивной мощности, исходя из основной гармоники тока в питающей сети.

Величина емкости батареи конденсаторов и индуктивность реактора РРМ при известных значениях тока и напря-

жения определяются из выражений

$$C = \frac{V^2 - 1}{V^2} \cdot \frac{I_c}{\omega U_1} ; L = \frac{1}{V^2 - 1} \cdot \frac{U_1}{\omega I_c} ,$$

где $V = \omega_0 / \omega$.

Точная настройка резонансного LC-контура на подавление какой-либо гармоники тока является нецелесообразной, так как при этом подавление гармоник более высокого порядка значительно снижается. Обычно частоту контура выбирают несколько меньше, чем $(2k+1)\omega$, где: $k=0,1,2,\dots/113/$.

Метод расчета по основной гармонике позволяет определить параметры PPM в любой зоне регулирования с достаточной степенью точности, а также рассчитать изменения величины основной гармоники тока питающей сети и установить приближенную величину фазового сдвига тока и напряжения. Однако, метод не позволяет установить изменения гармонического состава тока питающей сети и коммутационных потерь.

Для окончательного выбора параметров LC-контура и определения характеристик компенсационного преобразователя разработана математическая модель, учитывающая конечные параметры нагрузки и питающей сети. В работе использован численный метод расчета преобразовательной системы по интервально-временным схемам замещения, которых для двухзонного преобразователя в зависимости от интервала работы восемь. В модели питающая сеть представлена источником ЭДС с сосредоточенными параметрами (R,L) , а цепь нагрузки - активным индуктивным сопротивлением с ЭДС. По алгоритму работы преобразовательной установки составлены мгновенные схемы замещения для всех возможных интервалов работы преобразователя и для каждой схемы записаны системы дифференциальных уравнений, характеризующих данный интервал работы преобразователя.

Исползуя программу для расчета на ЭВМ электромагнитных процессов в силовой цепи преобразователя были получены мгновенные значения токов и напряжений, а затем вычислены энергетические показатели в квазиустановившихся режимах. Анализ процессов позволил уточнить параметры LC-контуров и выбрать частоту их собственных колебаний, которая в первой зоне равна приблизительно 180 Гц, а во-

второй - 135 Гц.

Если выбирать величину эквивалентной емкости РРМ, исходя из максимума реактивной мощности в каждой зоне, получим, что в процессе регулирования основная гармоника потребляемого тока будет всегда опережать по фазе приложенное напряжение. Анализ результатов позволяет сделать вывод, что при этом имеем полный эффект перекомпенсации, когда в любом режиме выпрямления ток в питающей сети имеет емкостной характер, что может быть использовано для компенсации реактивной мощности параллельно работающих потребителей. При малых и, напротив, при больших углах управления каждой зоны выпрямления имеем значительную перекомпенсацию, что приводит к росту фазового угла.

Более качественную компенсацию реактивной мощности получим при некотором снижении выбранной величины емкости РРМ до (75-80)% от максимальной. В этом случае в любом режиме работы выпрямителя угол сдвига фаз не будет превышать 20° , а значения коэффициента сдвига будут не меньше 0,94, что позволяет сделать вывод, что именно подобный вариант выбора величины РРМ следует признать наиболее рациональным. Помимо влияния на основную гармонику тока РРМ оказывает влияние и на высшие гармоники потребляемого тока. Особое влияние на входные характеристики выпрямителя оказывают 3 и 5 гармоники, значения которых в кривой потребляемого тока значительны. Поэтому для снижения величин этих гармоник в питающей сети сопротивление РРМ на этих частотах должно быть минимальным.

Как показали расчеты в квазиустановившихся режимах работы выпрямителя выбранная собственная частота LC-контура практически оказывает одинаковое влияние на снижение высших гармоник тока в питающей сети.

В третьем разделе исследовано влияние регулятора реактивной мощности, установленного на электроподвижном составе, на тягово-энергетические показатели электропоезда. Выявлено влияние регулятора реактивной мощности на потери напряжения входного преобразователя, энергетические показатели и производительность электропоезда.

Подключение РРМ к вторичным обмоткам тягового трансформатора оказывает влияние на продолжительность процессов коммутации в преобразователе из-за снижения потерь

напряжения в питающей сети за счет уменьшения величины потребляемого тока. Наибольшее уменьшение угла коммутации $(10+15)\%$ наблюдается при значениях углов управления, меньших 45° и больших 135° и достигает $(5+9)^\circ$, что в свою очередь обеспечивает снижение угла сдвига фаз между током и напряжением.

Уменьшение углов коммутации в ВКУ с РРМ приводит к тому, что в выпрямителе происходит снижение потерь напряжения, вызванное процессом коммутации приблизительно на 25%. Учитывая, что для тяговых выпрямителей потери напряжения составляют 10-15% при номинальном токе, то их снижение на 25% равноценно увеличению выпрямленного напряжения на 2,5+4%.

Энергетические показатели тягового привода определяются коэффициентом мощности и коэффициентом полезного действия, которые характеризуют качество и эффективность преобразования электрической энергии, поступающей от источника. Оценку влияния РРМ на потери мощности в системе преобразования энергии можно произвести, определив потери активной мощности на отдельных элементах системы энергоснабжения и в самом регуляторе.

Изменение потерь мощности в системе энергоснабжения можно определить из соотношения

$$\frac{\Delta P_{\Sigma}(\text{с РРМ})}{\Delta P_{\Sigma}(\text{б сз РРМ})} = \frac{\lambda_{\Sigma}^2(\text{с РРМ})}{\lambda_{\Sigma}^2(\text{б сз РРМ})}$$

С учетом выполненных оценок по определению коэффициентов мощности λ (без РРМ)=0,7+0,73 и λ (с РРМ)=0,99 в режиме тяги следует, что потери мощности в системе тягового энергоснабжения уменьшаются в 1,5+1,8 раза. В режиме электрического торможения эффект снижения потерь в системе тягового энергоснабжения будет еще более существенным. В силу малости λ (без РРМ)=0,6 снижение потерь произойдет более чем в 2 раза.

Дополнительный эффект снижения потерь от повышения коэффициента мощности достигается в системе внешнего энергоснабжения. Так потери мощности во внешнем энерго-

снабжении в 3 раза больше, чем в контактной сети. Поэтому, при общих потерях мощности в системе энергоснабжения, достигающих $(10+12)\%$, применение РРМ позволяет уменьшить эти потери и сэкономить до $(4+5)\%$ электроэнергии.

Применение РРМ на электроподвижном составе приводит к подъему внешней характеристики ВКУ, который вызван увеличением напряжения на вторичной обмотке трансформатора и уменьшением углов коммутации. Подъем внешней характеристики ВКУ с РРМ отражается на электромеханических и электротяговых характеристиках подвижного состава. Таким образом использование РРМ на электропоезде наряду с повышением энергетических показателей увеличивает производительность электропоезда, сокращая время хода и увеличивая участковую и техническую скорость движения.

В четвертом разделе рассмотрены вопросы применения на электроподвижном составе входных преобразователей с искусственной коммутацией. Приведены результаты теории анализа гармонического состава напряжений с ШИМ, установлены общие закономерности частотных спектров, результаты анализа процессов в четырехквadrантном преобразователе. Даны основные соотношения, позволяющие производить расчет токов, напряжений и коэффициента мощности электроподвижного состава с четырехквadrантными преобразователями.

Применение во входных преобразователях искусственной коммутации позволяет работать не только с нулевым, но и с опережающим сдвигом по фазе, что для контактной сети переменного тока и всей системы электроснабжения эквивалентно подключению в месте нахождения ЭПС компенсирующего устройства. Это позволяет повысить коэффициент мощности не только на токоприемнике, но и всей системы электроснабжения, что снижает токовую нагрузку контактной сети и, как следствие, уменьшает потери мощностей в ней.

Использование математического аппарата двойного ряда Фурье позволило с единых методологических позиций исследовать напряжения с двухтактной ШИМ 1-го рода при любой кратности p несущей ω и модулирующей ω_m частот. Полученные при этом в общем виде математические выражения дают возможность с использованием только описания модулирующей функции и пилообразного напряжения находить коэффициенты

разложения двойного ряда Фурье, определяющего гармонический состав напряжений ШИМ.

В приложении приведен акт внедрения результатов работы в учебный процесс.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Анализ режимов работы электропоездов переменного тока показал, что с целью повышения энергетических показателей тягового электропривода целесообразно использовать двухзонный преобразователь с фазовым регулированием напряжения и регулятором реактивной мощности.

2. Разработанная математическая модель сложной вентильной системы, включающая в себя тяговую подстанцию, контактную сеть переменного тока, тяговый трансформатор электропоезда и входной двухзонный преобразователь выпрямительно-инверторного типа, показала, что уровень реактивной мощности в разных зонах регулирования отличается примерно в два раза, что требует применения секционированной компенсации реактивной мощности.

3. На основании анализа электромагнитных процессов в системе тягового электропривода электропоезда с учетом реальных изменений параметров элементов, имеющих место при эксплуатации, получены расчетные соотношения для определения параметров регулятора реактивной мощности, а также определены собственные частоты колебаний LC-контура регулятора.

4. Исследование влияния степени компенсации реактивной мощности на энергетические показатели электропривода переменного тока показали, что эквивалентная емкость регулятора реактивной мощности для получения наибольших значений коэффициента мощности во всем диапазоне изменения напряжения каждой зоны регулирования должна быть на уровне 70+80% от максимальной при полной компенсации.

5. На основании анализа энергетических показателей входных преобразователей установлено, что включение секционированного регулятора уменьшает продолжительность коммутационного интервала на 10+15% и снижает потери в системе первичного энергоснабжения на (4+5%);

6. Применение принудительной коммутации тока вентилей преобразовательных мостов позволяет существенно повысить коэффициент мощности на входе установки во всем диапазоне регулирования по сравнению с многозонным диодно-тиристорным преобразователем. При этом наилучшие показатели получаем во второй зоне регулирования, где высшие гармоники потребляемого тока минимальны.

7. Полученные в общем виде выражения дают возможность с использованием только описания модулирующей функции и пилообразного напряжения находить коэффициенты разложения двойного ряда Фурье, определяющего гармонический состав напряжений с двухтактной ШИМ 1-го рода.

8. Исследование четырехквadrантного входного преобразователя с нагрузкой в виде асинхронных трехфазных двигателей с автономными инверторами напряжения показало, что преобразователь позволяет работать не только с нулевым, но и с опережающим сдвигом по фазе, что для контактной сети переменного тока и всей системы электроснабжения эквивалентно подключению компенсирующего устройства.

9. Особенность выполненного исследования заключается в том, что введение в цепь нагрузки входного преобразователя последовательного элемента со значительной индуктивностью позволило обобщить результаты работы на перспективные системы тягового электропривода с двигателями переменного тока, которые подключают к звену постоянного тока преобразователя через автономный инвертор тока или инвертор напряжения.

Основные положения диссертации отражены в следующих работах:

1. Анализ установившихся процессов работы инверторов повышенной частоты /Кондрак Кутейба, Сенько Е.В., Шаабане Сами, Бен Мустафа Риад; Киевский политехнический институт.-Киев, 1995.-34 с. Рук. деп. в ГНТВ Украины, №2605.-Ук95.

2. Сенько В.И., Бен Мустафа Риад. Математическая модель компенсационного преобразователя с учетом параметров нагрузки и питающей сети. Киев. политехнич. институт.-Киев, 1996. - 28 с. Рук. деп. в УкрИНТЭИ, №180 - Ук96.

3. Сенько В.И., Бен Мустафа Риад. Влияние регулятора реактивной мощности на энергетические параметры входного преобразователя. Киев. политехнич. институт. - Киев, 1996.-

31 с.Рук. деп. в УкрИНТЭИ, №179 - Ук96.

4. Сенько Е.В., Бен Мустафа Риад, Омар Абду-алазиз Мухамед Абдуалла. Однофазные входные преобразователи, питающие автономные инверторы напряжения. Киев, политехнич. институт. - Киев, 1996. - 28 с. Рук. деп. в УкрИНТЭИ, №178-Ук96.

5. Сенько В.І., Бен Мустафа Риад. Компенсаційний вхідний перетворювач. Зб.: Експрес-новини. Наука, техніка, виробництво. Дайджест-бюлетень. УкрІНТЕІ. №4, 1997. - 2 с.

6. Сенько Е.В., Бен Мустафа Риад. Енергетичні параметри вхідного перетворювача з регулятором реактивної потужності. Зб.: Експрес-новини. Наука, техніка, виробництво. Дайджест-бюлетень. УкрІНТЕІ. №4, 1997. - 2 с.

7. Сенько Е.В., Бен Мустафа Риад, Омар Абду-алазиз Мухамед Абдуалла. Однофазні вхідні перетворювачі. Зб.: Експрес-новини. Наука, техніка, виробництво. Дайджест-бюлетень. УкрІНТЕІ. №4, 1997. - 2 с.

Личный вклад автора. В работах, опубликованных в соавторстве, диссертанту принадлежит: /1/- предложена методика анализа электромагнитных процессов и составлена математическая модель преобразователя; /2/- составлена математическая модель компенсационного преобразователя и определены рациональные параметры регулятора мощности; /3/- проведен расчет энергетических показателей входного преобразователя с учетом регулятора реактивной мощности; /4/- проведен анализ ШИМ сигналов, на основании которого проанализированы процессы в четырехквadrантном преобразователе; /5/- предложен способ повышения коэффициента мощности входного преобразователя; /6/- определены энергетические показатели преобразователя; /7/- предложены мероприятия улучшения электромагнитной совместимости преобразователя с другими устройствами, которые также улучшают коэффициент мощности.

ABSTRACT

Ben Mustafa Riadh Ben Amor. Converting plants with improved technico-economical indexes for regulating electric drive.

The dissertation on competing the scientific degree of a Candidate of Technical Sciences on speciality 05.09.12 - "Semiconductor converters of electric energy". The National Technical University of Ukraine "KPI", Kiev, 1997.

7 scientific papers based on the theoretical researches and computation experiments aiming at the developing the mathematical models of entrance converters and permitting to make the analysis processes in the power part and computing the conversion units with their power coefficient. The recommendations for using entrance converters with regulator of reactive power and four-squared.

АНОТАЦІЯ

Бен Мустафа Ріад Бен Амор. Перетворювальні установки з поліпшеними техніко-економічними показниками для регульованого електропривода.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.12 - напівпровідникові перетворювачі електроенергії. Національний технічний університет України "КПІ", Київ, 1997.

Захищається 7 наукових праць, у яких на основі теоретичних досліджень та обчислювальних експериментів розроблено математичні моделі вхідних перетворювачів, що дозволяє провадити аналіз процесів у силовій частині та розрахунок перетворювальних пристроїв з оцінкою їх коефіцієнта потужності, подано рекомендації щодо використання вхідних перетворювачів з регулятором реактивної потужності та чотирьохквadrантних.

Ключові слова: математична модель, вхідний перетворювач, регулятор потужності.

