

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УКРАИНЫ 'КИЕВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ'

На правах рукописи

ШААБАНЕ САМИ

(Тунис)

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ
ЧАСТОТЫ ДЛЯ РЕГУЛИРУЕМОГО
ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Специальность: 05.09.03 - 'Электротехнические комплексы
и системы, включая их управление
и регулирование'

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Киев-1995



00778298 (+)

Диссертацией является рукопись.

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

Научный руководитель - Действительный член Международной академии электротехнических наук, лауреат Государственной премии Украины, доктор технических наук, профессор Виталий Иванович Сенько

Научный консультант - кандидат технических наук, доцент Николай Петрович Макаренко

Официальные оппоненты - доктор технических наук, старший научный сотрудник Владимир Николаевич Исаков; кандидат технических наук, доцент Николай Валентинович Печеник

Ведущая организация - Харьковская Государственная академия железнодорожного транспорта

Защита состоится "11" марта 1996г. в 15 часов на заседании специализированного совета К 01.02.04 при Национальном техническом университете Украины "Киевский политехнический институт" /252056, г.Киев-56, проспект Победы, 37/.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан "___" *Инваря* 1996г.

Ученый секретарь
специализированного совета
кандидат технических наук,
доцент

ЛННБ ім. В. Стефаника
АН України

В.В. Прокопенко - В.В. Прокопенко

В-33. Удд

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Ускорение социально-экономического развития страны выдвигает задачу интенсификации всех отраслей народного хозяйства, в том числе и электротранспорта. Перед электротранспортом стоит задача увеличения провозной способности и повышения ритмичности перевозок, которые в значительной мере определяются техническим уровнем электропоездов. Существующий парк электропоездов уже сегодня не способен обслужить требуемые пассажиропотоки пригородных железнодорожных участков, которые в настоящее время составляют более 90% и имеют тенденцию к дальнейшему увеличению. Использование на эксплуатируемых электропоездах в качестве тяговых двигателей электрических машин постоянного (пульсирующего) тока практически исчерпало свои возможности в части повышения единичной мощности, приходящейся на тяговую ось моторного вагона.

Совершенствование тягового электропривода электропоездов в развитых странах мира идет по пути широкого внедрения силовой и информационной электроники, что открывает новые возможности для применения на перспективных электропоездах асинхронных тяговых двигателей (АТД) с короткозамкнутым ротором, имеющих ряд преимуществ перед коллекторными. Асинхронные тяговые двигатели по сравнению с коллекторными машинами при одних и тех же массогабаритных показателях имеют мощность на 40+50% выше. Коэффициент полезного действия АТД выше на 1.5+2%. Степень использования активных материалов (оценивается по их удельному расходу на единицу полезной мощности) у коллекторных машин составляет 8+10кг/кВт, а у АТД - 1.5+ +3кг/кВт. Простота конструкции, отсутствие коллекторно-щеточного узла определяют высокую надежность АТД и низкую стоимость технического обслуживания при эксплуатации, что особенно важно для пригородных электропоездов. Применение АТД позволяет также уменьшить массу материалов, необходимых для изготовления механической части электропоезда. В свою очередь, снижение массы тележки, сокращение ее базы, а также уменьшение ее момента инерции при высоких скоростях движения. Одно из важнейших достоинств АТД - его высокие

быстродействия - позволяет формировать жесткую тяговую характеристику и обеспечивает реализацию предельных по сцеплению сил тяги и торможения.

Более 70% пригородных железнодорожных перевозок осуществляется в настоящее время на электрифицированных участках постоянного тока.

Тяговый привод электропоезда постоянного тока с АТД требует обязательного применения преобразователя параметров электрической энергии, поступающей из контактной сети. Главное место в проблеме применения АТД занимают выбор принципиальной схемы преобразователя энергии, а также обеспечение устойчивой и эффективной работы тяговых двигателей во всех режимах. В качестве преобразователей могут применяться преобразователи тока или напряжения.

В настоящее время зарубежными фирмами созданы и успешно эксплуатируются на железных дорогах Западной Европы свыше 1000 единиц электроподвижного состава (ЭПС) различного назначения с АТД, регулирование режимов которых осуществляется при помощи полупроводниковых преобразователей на базе автономных инверторов напряжения (АИН) и автономных инверторов тока (АИТ).

Учитывая специфику АТД для электропоездов, возникает необходимость разработки и исследования рациональных структур силовых цепей преобразовательного оборудования для нового поколения электропоездов с АТД.

На решение этих задач направлены работы, проводимые на кафедре теоретических основ электротехники Киевского политехнического института в соответствии с координационным планом АН Украины по комплексной проблеме "Научные основы электроэнергетики" на 1991-1995г.г.

Поэтому разработка и исследование статических преобразовательных установок для питания асинхронных тяговых двигателей поездов является актуальной задачей.

Цель работы - решение научной задачи выбора рациональной структуры силовых цепей автономных инверторов, разработка и создание на их основе статических преобразовательных установок для питания асинхронных тяговых двигателей, а также путей повышения коэффициента полезного действия автономных инверторов, предназначенных для эксплуатации на линиях постоянного тока.

Достижение поставленной цели потребовало решения сле-

дующих задач:

1. Выявление особенностей АТП и определение требований, предъявляемых к преобразователям питания АТП электропоезда.

2. Обоснование построения, анализа и оптимизации структуры преобразователя частоты для питания АТД.

3. Разработка математической модели системы "контактная сеть постоянного тока" - статическая преобразовательная установка - асинхронный тяговый двигатель и анализ электромагнитных процессов в системе в квазиустановившихся режимах.

4. Анализ составляющих потерь в автономных инверторах при реализации заданных тяговых характеристиках электропоезда.

5. Обоснование применения методики разделения потерь для определения коэффициента полезного действия автономных инверторов в рабочем режиме.

6. Исследование возможностей повышения коэффициента полезного действия автономных инверторов путем рационального управления тиристорами и вывода элементной базы.

Методы исследования. Решение перечисленных задач осуществлялось на основе использования общей теории электрических цепей, теории линейных дифференциальных уравнений. Были применены методы гармонического анализа, эквивалентного генератора, численного анализа, физического моделирования и структурного анализа. Исследования выполнены методом математического моделирования на ЭВМ. Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций работы подтверждена экспериментально при лабораторных испытаниях физической модели преобразователей частоты.

Научная новизна.

1. Исследованы особенности АТП на электроподвижном составе, позволившие определить требования к статическим преобразовательным установкам, обеспечивающим требуемые энергетические характеристики АТД в широком диапазоне применения частоты вращения и момента нагрузки.

2. Разработаны математические модели электрической части АТП, позволившие анализировать электромагнитные процессы в силовой цепи тягового привода электропоезда.

3. Определены максимальные нагрузки элементов силовых

цепей автономных инверторов различных структур, позволившие рассчитывать преобразовательные устройства АТП.

4. Предложена методика анализа электромагнитных процессов, учитывающая специфику работы асинхронного тягового привода электропоезда, которая позволила проанализировать процессы в различных типах инверторов тока и определить области применения АИТ различных типов.

5. Разработана методика расчета потерь в автономном инверторе напряжения при реализации заданных тяговых характеристик электропоезда, позволившая определять коэффициент полезного действия автономного инвертора в автономном режиме.

6. Обоснована целесообразность снижения мощности потерь в автономных инверторах напряжения при реализации полной мощности за счет рационального управления тиристорами и выбора элементной базы.

Автор защищает.

1. Принципы построения асинхронного тягового привода электропоездов постоянного тока для железнодорожного транспорта, обеспечивающего улучшенные энергетические параметры преобразовательных установок и АТД.

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

3. Возможности снижения мощности потерь в автономных инверторах при реализации полной мощности за счет рационального управления тиристорами и выбора элементной базы.

4. Методику расчета составляющих потерь и коэффициента полезного действия автономных инверторов в автономном режиме.

Практическая ценность. Приведенные в работе выводы, зависимости, графики обеспечили возможность обоснованного выбора структуры преобразователя частоты моторвагонного электроподвижного состава и его проектирования. Полученные результаты позволяют повысить технико-экономический уровень электропоездов и могут быть использованы при разработке систем асинхронного электропривода не только на электроприводах, но и общепромышленного применения.

Реализация результатов работы в промышленности: результаты исследований нашли практическое применение при разработке полупроводниковых преобразователей частоты по договору №152 от 01.07.1994г. *Разработка преобразователя

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

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

Основное содержание исследований опубликовано в 4-х научных работах.

Структура и объем работы: диссертация состоит из введения, четырех разделов и заключения, изложенных на 150 страницах машинного текста, 89 рисунков, и 10 таблиц, списка литературы из 179 наименований и 2 приложений на 25 страницах. Общих объем работы составляет 289 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 исходные данные для исследований (выбрана составность электропоезда, приводятся расчетные тяговые и тормозные характеристики, определена необходимая мощность тяговых двигателей, приведены расчетные электромеханические характеристики АТД электропоезда) определяются требования, предъявляемые к статическим преобразовательным установкам для питания тяговых двигателей электропоездов с АТД с учетом специфики работы СПУ на подвижном составе. Изложены результаты обзора и анализа структур силовых цепей АТП электроподвижного состава отечественных и зарубежных дорог.

На современном уровне развития производства полупроводниковых приборов возможен широкий выбор преобразователей электроэнергии. В каждом конкретном случае построение силовой цепи тягового привода электропоезда соответствует одноц из следующих структур АТП: однозвенной, на базе автономного инвертора напряжения с широтно-импульсным регулированием выходного напряжения; двухзвенной, включающей в себя АИН и непосредственный преобразователь частоты

(НПЧ), либо импульсный прерыватель (ИП) и АИН с амплитудным законом регулирования, либо ИП и автономный инвертор тока.

Несмотря на свойственные инверторам тока недостатки, заключающиеся в повышенных коммутационных перенапряжениях, статические преобразовательные установки на базе АИТ по сравнению с другими структурами обладают существенными преимуществами, которые позволяют считать целесообразным для питания АТД электропоезда выбор преобразователя энергии на основе автономных инверторов тока. В таких преобразователях возможно применение тиристоров с большими временами выключения, обладающих высоким (до 44) классом по напряжению, при установке которых в тяговых АИТ не требуется их последовательного соединения.

Кроме того, СПУ на базе инверторов тока обладают более высоким КПД, особенно в области низких частот, так как исключается необходимая в случае применения АИН широтно-импульсная модуляция напряжения на зажимах АТД и, как следствие, уменьшаются потери мощности как в преобразователе, так и в двигателе. В статических преобразователях с использованием АИТ легче протекают аварийные режимы, связанные с "опрокидыванием" инвертора. В связи с тем, что инвертор тока на входе имеет реактор с большей индуктивностью, то скорость нарастания аварийного тока через полупроводниковые приборы не превышает значений, соответствующих нормальному режиму.

Односторонняя проводимость плеч инвертора тока исключает появление короткого замыкания АИТ, и, как следствие, возникновение инверсных моментов, отрицательно сказывающихся на механической части привода.

Устранение пульсаций электромагнитного момента двигателя при питании его от инвертора тока можно достичь применением АТД с двумя трехфазными обмотками, подключенными к двум АИТ, работающим со сдвигом по фазе на 30 эл.град. Это исключает необходимость применения широтно-импульсной модуляции тока в инверторе и позволяет снизить пульсации момента с $(25+30)\%$ до $(8+12)\%$, что является вполне приемлемым для тягового двигателя электропоезда.

Рассмотрен вопрос запуска АИТ, применение которых возможно на моторвагонном электроподвижном составе. Отмечается, что с этой точки зрения наиболее предпочтительной

структурой инвертора является АИТ с вынесенными узлами коммутации, так как не требуется специального устройства пуска его в работу. Запуск двухмостового инвертора тока можно осуществить посредством изменения алгоритма управления тиристорами силовой цепи АИТ. АИТ с отсекающими диодами требует специального устройства запуска.

Во втором разделе посвящен разработке математической модели силовой цепи асинхронного тягового привода. Модель силовой цепи АТП электропоезда составлялась на основе системного подхода: С этой точки зрения электрическая часть привода электропоезда с АТД, питающегося от контактной сети постоянного тока представляет собой систему, включающую в себя: входную цепь (контактная сеть, входной фильтр), входной преобразователь (импульсный прерыватель), фильтр промежуточного звена, выходной преобразователь (автономные инверторы) и асинхронные тяговые двигатели.

Для каждого звена тягового привода составлены свои дифференциальные уравнения электрического равновесия. Полученные дифференциальные уравнения затем объединены уравнениями связи в единую систему уравнений, которую решают тем или иным способом.

В работе проведены исследования электромагнитных процессов в следующих структурах инверторов тока: АИТ с отсекающими диодами; АИТ с цепями ускоренного перезаряда коммутирующих конденсаторов; двухмостовой АИТ; АИТ с вынесенными узлами коммутации.

В разработанной модели контактная сеть представлена сосредоточенной RL -нагрузкой.

В статической преобразовательной установке электропоезда с АТД, предназначенного для эксплуатации на линиях постоянного тока, регулирование тока тяговых двигателей осуществляется импульсным прерывателем. Процесс регулирования тока на выходе ИП заключается в поочередном включении его линейного тиристора и обратного диода. В модели импульсного прерывателя коммутацию вентиля считаем мгновенной. С целью уменьшения погрешности при расчете в разработанной модели ИП ВАХ вентиля заменена кусочно-линейной аппроксимацией. При этом в модели учитывается динамическое сопротивление вентиля (путем увеличения сопротивления соответствующей цепи) и его пороговое напряжение

(за счет внесения в цепь источника питания напряжения e_{02} , равного сумме пороговых напряжений последовательно соединенных вентилях). Разработка математической модели входного преобразователя сводится к составлению дифференциальных уравнений связи между входными и выходными параметрами (токами и напряжениями) импульсного прерывателя. Уравнения связи определяются с использованием логических функций включения вентилях ИП, т.е.

$$\begin{aligned} L_{bx} \frac{di_{bx}}{dt} &= E_{KC} - R_{bx} i_{bx} - u_{c, bx}, \\ C_{bx} \frac{du_{c, bx}}{dt} &= i_{bx} - i_{\phi} V1, \\ L_{\phi} \frac{di_{\phi}}{dt} &= u_{c, bx} V1 - e_{02} V2 - u_{dn} - R_{\phi} i_{\phi}, \end{aligned} \quad (1)$$

где L_{ax}, C_{ax}, R_{ax} - параметры входной цепи; E_{kc} - напряжение контактной сети; i_{ax}, u_{cax} - ток входной цепи и напряжение на конденсаторе входного фильтра; L_{ϕ}, R_{ϕ} - параметры промежуточного фильтра; i_{ϕ} - выходной ток ИП; $V1, V2$ - логические переменные вентилях; u_{dn} - напряжение на входе автономного инвертора.

Для описания работы асинхронного тягового двигателя, питающегося от АИТ, при фиксированной частоте вращения ротора уравнения машины удобно записать через линейные напряжения АТД

$$\begin{aligned} u_{AB} &= R_1(i_A - i_B) + \sigma L_1 \left(\frac{di_A}{dt} - \frac{di_B}{dt} \right) + K_2 \left(\frac{3}{2} \frac{d\psi_{2a}}{dt} - \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{d\psi_{2\beta}}{dt} \right); \\ u_{BC} &= R_1(i_B - i_C) + \sigma L_1 \left(\frac{di_B}{dt} - \frac{di_C}{dt} \right) + K_2 \sqrt{3} \frac{d\psi_{2\beta}}{dt}; \\ u_{AC} &= R_1(i_A - i_C) + \sigma L_1 \left(\frac{di_A}{dt} - \frac{di_C}{dt} \right) + K_2 \left(\frac{3}{2} \frac{d\psi_{2a}}{dt} + \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{d\psi_{2\beta}}{dt} \right); \\ 0 &= R_2 K_2 i_A + \frac{R_2}{L_2} \psi_{2a} + \frac{d\psi_{2a}}{dt} + \omega_{bp} \psi_{2\beta}; \\ 0 &= R_2 K_2 \frac{2i_B + i_A}{\sqrt{3}} + \frac{d\psi_{2\beta}}{dt} + \frac{R_2}{L_2} \psi_{2\beta} - \omega_{bp} \psi_{2a}, \end{aligned} \quad (2)$$

где R_1, R_2, L_1, L_2, L_m - параметры схемы замещения двигателя; $i_A, i_B, i_C, u_{AB}, u_{BC}, u_{AC}$ - соответственно фазные токи и линейные напряжения двигателя; $\psi_{2a}, \psi_{2\beta}$ - проекции потокосцепления ротора на оси a и β машины; ω_{bp} - электрическая уг-

ловая скорость вращения ротора двигателя; $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2}$;

$$K_2 = \frac{L_m}{L_2}.$$

Учитывая, что для двигателей, имеющих соединение статорных обмоток в "звезду", $u_A + u_B + u_C = 0$, $i_A + i_B + i_C = 0$, $u_{AB} + u_{BC} + u_{AC} = 0$, одно из трех уравнений, описывающих электромагнитные процессы в статоре в системе дифференциальных уравнений (2) можно исключить.

Спецификой работы асинхронного двигателя, подключенного к АИТ, является его двухфазное питание. При этом в системе дифференциальных уравнений (2) в случае отключения той или иной фазы двигателя исключается еще одно из первых трех уравнений.

Для удобства выполнения расчетов кривую намагничивания задают в виде аппроксимирующей функции. При принятых выше допущениях, а также пренебрегая гистерезисом магнитной цепи машины, в качестве аппроксимирующей функции можно выбрать гиперболическую зависимость $L_m(i_m)$

$$L_m(i_m) = \frac{1}{A|i_m| + B},$$

где $A = \frac{K_H - 1}{K_H - \Psi_H}$; $B = \frac{I_{xx}}{\Psi_H K_H}$;

Ψ_H - номинальное потокосцепление АД; $K_H = \frac{F}{F\delta} \approx \frac{I_{xx}}{I_{ms}}$ - коэффициент насыщения двигателя; $F = F_s + F_{cm}$ - намагничивающая сила обмотки ротора двигателя; F_s, F_{cm} - магнитные напряжения соответственно в воздушном зазоре и стали двигателя; I_{xx} - ток холостого хода двигателя; I_{ms} - составляющая намагничивающего тока, пропорциональная магнитному напряжению в воздушном зазоре двигателя.

Математическая модель асинхронного тягового двигателя обычно устанавливается для анализа квазиустановившихся электромагнитных процессов в силовой цепи привода, например, электропоезда, имеющего заданные рассчитанные тяговые характеристики, для которого определены предельные электромеханические характеристики АД. Это обстоятельство позволяет рассчитать величину взаимной индуктивности обмоток ротора и статора двигателя для конкретного режима

работы АД и при анализе электромагнитных процессов в электрической части асинхронного тягового привода электропоезда для рассматриваемого квазиустановившегося режима считать ее постоянной величиной.

Особенностью моделирования электромагнитных процессов в силовой цепи АТП с преобразователями на базе инверторов тока является необходимость учета коммутационных процессов в АИТ.

Математическая модель силовой цепи асинхронного тягового привода представляет собой систему дифференциальных уравнений электрического равновесия ее звеньев для каждой конкретной схемы замещения АИТ. Так, например, для инвертора с вынесенными узлами коммутации на интервале коммутации фазных токов i_A и i_C АТД полная система дифференциальных уравнений модели силовой цепи АТП электропоезда будет следующей

$$\begin{aligned}
 L_{bx} \frac{di_{bx}}{dt} &= E_{KC} - R_{bx} i_{bx} - u_{c bx}; \\
 C_{bx} \frac{du_{c bx}}{dt} &= i_{bx} - i_{\phi} V1; \\
 L_{\phi} \frac{di_{\phi}}{dt} &= u_{Cex} V1 - e_{02} V2 - u_{dx} - R_{\phi} i_{\phi}; \\
 C_k \frac{du_{CK}}{dt} &= i_{\phi} - i_{LK} - i_A; \\
 L_k \frac{di_{LK}}{dt} &= u_{CK} - R_k i_{LK}; \\
 \sigma L_A \left(\frac{di_A}{dt} - \frac{di_C}{dt} \right) + K_2 \left(\frac{3}{2} \frac{d\psi_{2\alpha}}{dt} + \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{d\psi_{2\beta}}{dt} \right) &= u_{CK} - R_4 (i_A - i_C); \\
 \sigma L_A \left(-\frac{di_A}{dt} - 2 \frac{di_C}{dt} \right) + K_2 \sqrt{3} \frac{d\psi_{2\beta}}{dt} &= R_4 (i_A + 2i_C); \\
 \frac{d\psi_{2\alpha}}{dt} &= R_2 K_2 i_A - \frac{R_2}{L_2} \psi_{2\alpha} - \omega_{2p} \psi_{2\beta}; \\
 \frac{d\psi_{2\beta}}{dt} &= -\frac{R_2}{\sqrt{3}} K_2 (i_A + 2i_C) + \omega_{2p} \psi_{2\alpha} - \frac{R_2}{L_2} \psi_{2\beta},
 \end{aligned} \tag{4}$$

где первые два уравнения являются уравнениями электрического равновесия входной цепи; третье - уравнением связи; шестое - девятое - уравнениями асинхронного двигателя; четвертое и пятое - уравнениями соответственно для коммутирующего конденсатора C_k и реактора L_k .

Аналогичным образом формируется система дифференциальных уравнений электрического равновесия силовой цепи АТЭ для других мгновенных схем замещения инвертора. При подключении резисторно-емкостного (R_0, C_0) устройства ограничения перенапряжений УОП добавляются уравнения для конденсатора $C_0 - C_0 \frac{du_{C0}}{dt} = i_{C0}$ и для резистора $-R_0 i_{R0} = u_{C0}$.

Моменты переходов от одной схемы АИТ к другой определяются условиями включения и выключения тиристорov инвертора.

Уравнения математической модели силовой цепи АТЭ электропоезда с другими структурами АИТ составляются подобно выше рассмотренному.

Разработанная математическая модель силовой цепи асинхронного тягового привода электропоезда позволяет анализировать электромагнитные процессы в квазиустановившихся режимах при постоянной частоте вращения ротора асинхронного двигателя.

Для решения дифференциальных уравнений системы тягового привода электропоезда на цифровой вычислительной машине применен численный метод Рунге-Кутты четвертого порядка с переменным шагом интегрирования. Свойственная методу составляющая ошибки - погрешность определения переходов от одной мгновенной схемы замещения к другой, устраняется программным способом.

Третий раздел посвящен исследованию с помощью математических моделей электромагнитных процессов в силовой цепи автономных инверторов тока, имеющих различную структуру, а также расчету КПД инверторов тока.

Основной особенностью электрооборудования, предназначенного для электропоездов постоянного тока с АТД, является уровень напряжения, который определяется напряжением в контактной сети. Создание выходного преобразователя на такое высокое напряжение является достаточно сложной задачей, так как требует последовательно соединения большого числа полупроводниковых приборов, применения высоковольтных конденсаторов. Поэтому представляется целесообразным дробление мощности выходного преобразователя. Одним из таких вариантов является изготовление АИТ в виде двух последовательно соединенных модулей, каждый из которых рассчитан на напряжение 1500 В.

Расчет электромагнитных нагрузок выходного преобразователя электропоезда в диссертации выполнен для одного модуля - автономного инвертора тока, питающего два асинхронных тяговых двигателя. Регулирование входного тока инвертора осуществляется входным импульсным прерывателем.

Для сравнения результатов теоретических и экспериментальных исследований в качестве нагрузки преобразователя использован асинхронный двигатель типа ЭТА-300. Расчеты выполнены для режимов работы привода, соответствующих предельным электромеханическим характеристикам АТД.

Анализ электромагнитных процессов в силовых цепях АИТ электропоезда позволил выявить тяжелые эксплуатационные режимы работы тягового электропривода, для которых были рассчитаны параметры основных элементов силовой цепи инверторов тока. На основании полученных результатов были определены комплектующие элементы силовой цепи выходного преобразователя электропоезда и масса различных вариантов структур инверторов тока при использовании коммутирующих конденсаторов типа ПСК, ПЖ. Расчеты выполнены для следующих структур: АИТ с отсекающими диодами; АИТ с отсекающими диодами с устройством ограничения перенапряжений; АИТ с цепями ускоренного перезаряда коммутирующих конденсаторов; двухмостовой АИТ; двухмостовой АИТ с УОП; АИТ с вынесенными узлами коммутации.

Результаты расчетов показали, что с точки зрения массы преобразовательной установки перспективного электропоезда с АТД, питающегося от контактной сети постоянного тока, при существующей элементной базе наиболее предпочтительной структурой силовых цепей обладает АИТ с отсекающими диодами и устройством ограничения перенапряжений, масса которого (при установке конденсаторного типа ПЖ) на одну секцию составляет 4009 кг (3,34 кг/кВт). Несколько большую массу имеет АИТ с отсекающими диодами (при соединении коммутирующих конденсаторов типа ПСК "звездой") - 4030 кг (3,36 кг/кВт).

Применение конденсаторного оборудования с высокими удельными массогабаритными показателями значительно снижает массу преобразовательной установки электропоезда. Включение в силовую цепь АИТ конденсаторов, имеющих параметры, например, аналогичные конденсаторам типа МГ (ФРГ), приводит к тому, что наиболее целесообразным выходным

преобразователем будет АИТ с цепями ускоренного перезаряда коммутирующих конденсаторов (масса инвертора равна 3250 кг или 2,7 кг/кВт).

В работе показано, что применение АИТ с цепями ускоренного перезаряда коммутирующих конденсаторов целесообразно при значительных емкостях конденсаторов (более 600 мкф), что приводит к снижению уровня перенапряжений на 13+15% или при расширении диапазона регулирования частоты тока статора тяговых двигателей на 20%.

В этой же главе работы выполнен расчет КПД инверторов тока. Наименьший КПД (96,8%) в номинальном режиме имеет АИТ с отсекающими диодами без применения устройства ограничения перенапряжений, вследствие повышенной нагрузки его элементов по напряжению. Установка в таком инверторе устройства УОП повышает его КПД до 98,1% (при предположении активного использования энергии коммутационных перенапряжений).

Двухмостовой АИТ с устройством ограничения перенапряжений и АИТ с цепями ускоренного перезаряда коммутирующих конденсаторов имеют примерно одинаковый КПД (97,6%). КПД двухмостового АИТ без УОП и АИТ с вынесенными узлами коммутации соответственно равны 97,2% и 97,1%.

В четвертом разделе проведено исследование рабочих электромагнитных процессов в автономном инверторе напряжения в зависимости от алгоритмов управления тиристорами, разработана методика определения рабочих потерь, проведено их исследование и зон анализ КПД.

Тип входного преобразователя и промежуточного звена различных структур преобразования электрической энергии для питания АТД определяется типом выходного преобразователя, в качестве которого кроме АИТ очень часто используется АИН. Выбор варианта структурной схемы преобразователей для АТП электропоезда зависит от технико-экономических показателей, состояния и перспектив развития промышленности по производству полупроводниковых приборов, конденсаторов и реакторного оборудования.

Для сравнения различных схем АИТ и АИН по КПД, необходимо определить потери в АИН. Так как потери в АИН в

основном определяются рабочими процессами, то в диссертационной работе получены выражения и кривые для токов и напряжений, позволяющие определять последние при различных длительностях открытого состояния рабочих тиристоров.

Выражения и кривые, полученные при анализе рабочих процессов в АИН при различных длительностях открытого состояния рабочих тиристоров, позволяют определять токи и напряжения, необходимые для выбора элементов инвертора.

Разработана методика определения рабочих потерь в АИН, позволившая проанализировать потери при различных алгоритмах управления рабочими тиристорами.

Выполнена оценка снижения составляющих потерь при использовании элементной базы с перспективными параметрами.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Для электропоезда с асинхронными тяговыми двигателями, питающегося от контактной сети постоянного тока, с точки зрения массогабаритных и стоимостных показателей наиболее рациональной преобразовательной установкой является двухзвенный преобразователь, включающий в себя импульсный прерыватель и автономный инвертор тока с отсекающими диодами при соединении коммутирующих конденсаторов "звездой".

2. На основании использования численных методов расчета разработана математическая модель системы "контактная сеть постоянного тока - преобразовательная установка - асинхронный тяговый двигатель", с использованием которой выявлены расчетные нагрузки и выбраны параметры основных элементов инверторов тока.

3. Проведенные теоретические исследования и анализ квазиустановившихся электромагнитных процессов в силовых цепях АИТ показали, что при существующей элементной базе наименьшей удельной массой обладает инвертор тока с отсекающими диодами с устройством ограничения напряжений (3.34кг/кВт при установке конденсаторов типа ПЖ) и АИТ с отсекающими диодами при соединении коммутирующих конденсаторов "звездой" (3.36кг/кВт при установке конденсаторов типа ПСК).

4. Применение конденсаторного оборудования с высокими удельными массогабаритными показателями значительно снижает массу преобразовательной установки электропоезда и наиболее целесообразной структурой силовой цепи в этом случае обладает АИТ с цепями ускоренного перезаряда коммутирующих конденсаторов.

5. Применение АИТ с цепями ускоренного перезаряда коммутирующих конденсаторов позволяет снизить уровень перенапряжений на элементах инверторов на 13+15% или расширить диапазон регулирования частоты тока статора асинхронного двигателя на 20%.

6. Выполнен расчет коэффициента полезного действия различных структур инверторов тока, в результате которого установлено, что наибольший КПД имеет АИТ с отсекающими диодами с устройством ограничения перенапряжений при активном использовании энергии коммутационных перенапряжений (в номинальном режиме 98.1%). При рассмотрении вариантов структур АИТ с цепями ускоренного перезаряда коммутирующих конденсаторов (97.6%).

7. Доказано, что алгоритмы управления главными тиристорами влияют на потери в АИН. Применение алгоритмов, которым соответствуют интервалы проводимости главных тиристоров $5\pi/6$ и π , обеспечило снижение потерь в АИН при реализации полной мощности до 1.3 раза по сравнению с алгоритмом, которому соответствует интервал проводимости $2\pi/3$.

8. Разработана уточненная методика расчета составляющих потерь в АИН, которая может быть использована при разработке преобразователей частоты новых типов электропоездов.

9. Выполнена оценка снижения составляющих потерь при использовании элементной базы с перспективными параметрами. Показано, что применение тиристоров и диодов более высокого класса и с лучшими динамическими параметрами, коммутирующих конденсаторов и дросселей с меньшими активными сопротивлениями, слабо зависящими от частоты снижает потери в АИН при реализации полной мощности до 2.7 раза, что позволяет уменьшить расход электроэнергии.

10. Результаты исследований и рекомендаций диссертационной работы использованы в учебном процессе и могут быть использованы при разработке АИТ и АИН новых типов электропоездов.

Основные положения диссертации отражены в следующих работах:

1. О выборе нулевого обобщенного вектора напряжения для алгоритма ШИМ в трехфазном инверторе с нейтральной точкой / В.И. Сенько, Шаабане Сами, С.А. Лебеденко и др. // Депонир. в ГНТБ Украины, №1362 - Ук 94.- 14с.

Предложен алгоритм ШИМ трехфазного инвертора, позволивший уменьшить потери в ключах инвертора в рабочем режиме и тем самым увеличить КПД инвертора.

2. Сенько В.И., Шаабане Сами. Математическая модель асинхронного двигателя при питании от преобразователя частоты. Депонир. в ГНТБ Украины, №1912 - Ук94.- 6с.

Предложена модель двигателя при питании от автономного инвертора тока.

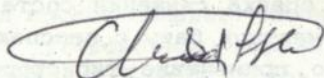
3. Математическая модель автономного инвертора тока. /Шаабане Сами, Сенько Е.В., Кондрак Кутейба// Депонир. в ГНТБ Украины, №2144 - Ук95. - 17с.

Разработана модель автономного инвертора тока, питающего асинхронный тяговый двигатель.

4. Анализ установившихся процессов работы инверторов повышенной частоты./Шаабане Сами, Сенько Е.В., Кондрак Кутейба, Вен Риад// Депонир. в ГНТБ Украины, №2605 - Ук95.- 34с.

Проведен анализ электромагнитных процессов в автономном параллельном инверторе тока и построены зависимости основных параметров при изменении добротности нагрузочного контура.

Соискатель



Шаабане Сами

ANNOTATION

Shaabane Sami. The Semiconductor Frequency Converters for the Controlled Electric Drive.

The dissertation on competing the scientific degree of a Candidate of Technical Sciences on speciality 05.09.03.-"Electrical Engineering Complexes and Systems" including their control and regulation. The National Technical University of Ukraine "KPI", Kiev, 1996.

4 scientific papers based on the theoretical researches and computation experiments aiming at the developing the mathematical models of the electrical part of the squirrel-cage electrical drives and permitting to make the analysis processes in the power part and computing the conversion units with their efficiency are defended. The recommendations for using the autonomous current and voltage converters on the newly designed trains are given.

АНОТАЦІЯ

Шаабане Самі. Напівпровідникові перетворювачі частоти для регульованого електроприводу.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 - електротехнічні комплекси і системи, включаючи їх управління і регулювання. Національний технічний університет України "КПІ", Київ, 1996.

Захищається 4 наукові праці, у яких на основі теоретичних досліджень та обчислювальних експериментів розроблено математичні моделі електричної частини асинхронного тягового приводу, що дозволяє провадити аналіз процесів у силовій частині та розрахунок перетворювальних пристроїв з оцінкою їх коефіцієнта корисної дії, подано рекомендації щодо використання автономних інверторів струму та напруги на електропоїздах нових типів.

Ключові слова: математична модель, інвертор струму, інвертор напруги, асинхронний двигун.

452818

АВ 33.922

Підп. до друку 25.12.95 Формат 60×84¹/₁₆. Папір
друк. № 2 Друк офсетний. Умовн. друк. арк. 40
Умовн. фарбо-відб. 40 Облік-вид. арк. 40
Тираж 100 Зам. № 5-5400.

Фірма «ВІПОЛ».
252151, Київ, вул. Волинська, 60.