

МОСКОВСКИЙ ордена ЛЕНИНА и ордена ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

471

*Герману Театовичу
в знак уважения
и признательности*

На правах рукописи

ХОХЛОВ Юрий Иванович

КОМПЕНСИРОВАННЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ С ФИЛЬТРАЦИЕЙ
В КОММУТИРУЮЩИЕ КОНДЕНСАТОРЫ НЕЧЕТНОКРАТНЫХ
ГАРМОНИК ТОКОВ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ БЛОКОВ

Специальность 05.09.12 - Полупроводниковые
преобразователи электроэнергии

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва - 1991

ПИ

Мам

Итальный зал
Профессорский»

Работа выполнена на кафедре "Теоретические основы электро-
техники" Челябинского политехнического института им. Ленинского
комсомола

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор	О.Г. Булатов
Заслуженный деятель науки и техники РСФСР,	
доктор технических наук, профессор	Т.А. Глазенко
Доктор технических наук	В.С. Феди

Ведущая организация - Научно-производственное объединение
"Уралэлектротяжмаш" г.Свердловск.


Защита состоится "12" апреля 1991 г. в аудитории ЭПП
в 16 час. 00 мин. на заседании специализированного совета
Д.053.16.13 при Московском ордена Ленина и ордена Октябрьской
Революции энергетическом институте.

Отзывы в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направ-
лять по адресу: 105835, ГСП, Москва, Е-250, Красноказарменная ул.,
д. 14, Ученый Совет МЭИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МЭИ.

Автореферат разослан "1" марта 1991 г.

Председатель специализированного
совета Д.053.16.13

 В.В. Шевченко

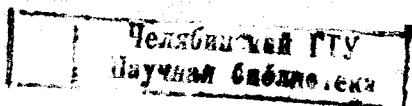


ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Одним из определяющих моментов Энергетической программы развития народного хозяйства страны является проведение активной энергосберегающей политики. Важнейшая задача энергосбережения – снижение потерь и повышение качества электрической энергии в сетях, питающих установки энергоемкой электротехнологии и транспорта (электролиз, электротермия, электрофицированный городской и железнодорожный транспорт и др.), где потребление энергии осуществляется на постоянном токе.

В настоящее время преобразование переменного тока в постоянный осуществляется преимущественно с помощью полупроводниковых некомпенсированных выпрямителей (НВ). Челябинским политехническим институтом совместно с НПО "Уралэлектротяжмаш" г.Свердловск и ГПИ "Цветметэлектропроект" г.Ташкент выполнены анкетирование и анализ работы НВ на ведущих предприятиях страны. Установлено, что выпускаемые до настоящего времени серийные НВ даже в неуправляемых режимах работы не обеспечивают удовлетворительной электромагнитной совместимости с питающей сетью по энергетическим показателям. Это связано как с недостаточно высоким коэффициентом сдвига первых, так и с превышением допустимого уровня высших гармоник в сетевых токе и напряжении. В результате в электрических сетях возникают значительные потери энергии, отклонения напряжений от номинальных значений, ограничивается пропускная способность по активной мощности, ухудшается "экологическая" электромагнитная обстановка для всех потребителей энергосистем. В управляемых режимах положение еще более обострено. Удовлетворение требований совместимости НВ с нагрузкой по регулированию электрического режима, как правило, сопровождается дальнейшим понижением энергетических показателей. В ряде случаев применяемые способы управления НВ приводят к недоиспользованию технологических возможностей потребителей. Общий ущерб от превышения лимита потребления реактивной мощности, искажения форм токов и напряжений питающих сетей и отклонений в технологических процессах только по основным предприятиям цветной металлургии СССР оценивается десятками миллионов рублей.

Решению проблемы обеспечения электромагнитной совместимости преобразовательной техники с питающей сетью и нагрузкой в настоящее время в отечественной и зарубежной литературе уделяется весьма



большое внимание. Проводится множество конференций и симпозиумов. На это направлены правительственные документы, материалы отраслевых совещаний и все ужесточающиеся требования ГОСТ.

В роли технических средств компенсации реактивной мощности и улучшения спектров токов и напряжений преобразовательных подстанций могут быть использованы синхронные и тиристорные компенсаторы реактивной мощности, пассивные фильтрокомпенсирующие устройства, активные фильтры, вентильные устройства частотного преобразования составляющих полной мощности, параметрические источники тока, выпрямители с повышенными энергетическими показателями, использующие двухоперационные тиристоры, нулевые и дополнительные вентили, несимметрию управления и различные способы принудительной коммутации.

Особое место в решении указанной проблемы принадлежит компенсированным выпрямителям (КВ), во всех или части вентильных групп которых используется одноступенчатая искусственная коммутация. Не умаляя достоинств других средств, следует признать, что они не являются тождественно альтернативными КВ. Эти средства, как правило, уступают КВ по простоте исполнения и эффективности использования компенсирующих устройств (КУ), что в условиях большого потока преобразуемой и острого дефицита конденсаторной мощностей на практике имеет решающее значение. К важнейшим достоинствам КВ следует отнести и то, что они позволяют осуществлять компенсацию реактивной мощности непосредственно в месте ее потребления. А это, наряду с оптимальностью компенсации, позволяет совершенствовать характеристики самих преобразователей и, следовательно, доводить возможности всей преобразовательной подстанции до уровня, недостижимого применением других средств. Одновременная работа КВ и НВ является эффективным способом снижения уровня высших гармоник в питающей сети, не требующим дополнительного оборудования. Имеются и другие достоинства КВ.

Необходимо, однако, заметить, что предложенные ранее КВ, выполнив возложенные на них функции, практически исчерпали свои возможности. Вместе с тем, естественный ход развития и расширения областей применения преобразовательной техники потребовал разработки и промышленного освоения новых перспективных преобразователей, умножающих лучшие свойства КВ. На актуальность работ в этой области указывают и результаты исследований предложенных симбиозных вариантов, подтвердивших широкие возможности сочетания положительных свойств симметричных КВ (СКВ) и других технических средств обеспечения электромагнитной совместимости. Таковыми, в частности, явля-

ются рассматриваемые в работе несимметричные (НКВ) и параметрически стабилизированные симметричные (ПССКВ) компенсированные выпрямители. Доведение новых технических решений до практической реализации невозможно без дальнейшего углубления теории электромагнитных процессов как в статических, так и динамических режимах работы КВ совместно с примыкающими к ним питающими сетями (ПС) и нагрузками (Н).

Отмеченное выше обусловило появление настоящей диссертации, которая подводит итог многолетней работы автора на кафедре "Теоретические основы электротехники" Челябинского политехнического института. Научные исследования проводились и продолжаются под руководством и при непосредственном участии автора в соответствии со следующими координационными планами и директивными документами:

- координационным планом НИР Минвуза СССР по проблеме "Потери электроэнергии и их компенсация" (приказ Минвуза СССР № 443 от 28.04.80 г.);

- Межвузовской целевой комплексной программой НИР на 1981 - 1985 годы по проблеме "Разработка методов и средств экономии электроэнергии в электрических системах" (приказ Минвуза СССР № 703 от 14.06.82 г.);

- распоряжением Совета Министров СССР № 2168р от 28.10.86 г. и приоритетным направлением развития народного хозяйства страны № 4.1. "Высокоэффективные технологии получения конструкционных материалов" по проблеме 10.10.03 "Комплекс трансформаторно-преобразовательного оборудования, обеспечивающего пуск и работу в номинальном режиме серий электролизеров на силу тока 160 - 300 кА и напряжение до 950 В" на 1989 - 1995 годы;

- "Программой по нормализации показателей качества электроэнергии и компенсации реактивной мощности на предприятиях алюминиевой подотрасли Минцветмета СССР в 1989 - 2001 годах", утвержденной Минцветметом СССР 26.06.89 г.

Целью диссертационной работы является теоретическое обобщение исследований в области выпрямителей с одноступенчатой искусственной коммутацией, разработка принципов построения, схемных решений, теоретических основ нового класса высокоэффективных КВ с фильтрацией в коммутирующие конденсаторы нечетнократных гармоник токов преобразовательных блоков и внедрение полученных результатов в практику проектирования и эксплуатации преобразователей.

Исходя из цели в работе решались следующие задачи:

- разработка общего алгоритма построения и реализации на его

основе КВ с нечетнократными гармониками токов блоков в коммутирующих конденсаторах;

- выбор общей стратегии и методов всестороннего исследования предложенных преобразователей;

- многоуровневый анализ электромагнитных процессов в комплексах "ПС-КВ-Н", предусматривающий:

а) приближенное исследование общих свойств и сопоставление широкого круга КВ и НВ по основным техническим характеристикам;

б) разработку теории квазиустановившихся процессов в комплексах с НКВ;

в) создание обобщенной теории квазиустановившихся процессов в комплексах с СКВ с учетом вскрытых явлений выравнивания постоянных составляющих выпрямленных токов параллельно включенных преобразовательных блоков и резонанса в контуре уравнивающего тока (УТ);

г) исследование способов регулирования и стабилизации выходных параметров КВ;

д) реализацию цифровых и физических моделей и моделирование сложных статических, а также эксплуатационных и аварийных динамических процессов в комплексах;

- разработка инженерной методики расчета предложенных КВ;

- расчет, проектирование и промышленные испытания первых КВ с фильтрацией в коммутирующие конденсаторы нечетнократных гармоник токов блоков, питающих электролизные серии цинка;

- расчет и проектирование серийных КВ.

Методы исследования. Для анализа электромагнитных процессов комплексы представлены цепями с многополюсными компонентами (МК). Системы компонентных уравнений записаны в формах, позволяющих полное определение параметров МК через экспериментально устанавливаемые и широко используемые в преобразовательной технике величины. Для обоснования компонентного уравнения нагрузки использованы формализм Лагранжа и экспериментальные исследования на первой промышленной установке нестационарного электролиза цинка. В результате питающая сеть и нагрузка замещены активными МК в форме Z , конденсаторная батарея КУ - трехполюсником в форме Y , а трансформаторное и реакторное оборудование - МК в Z и гибридной формах. Вентильные устройства представлены логическими МК, неидеальность каждого вентиля которых при протекании прямого тока учтена с помощью противо-ЭДС и активного сопротивления. Проводимость вентиля для обратного тока принята равной нулю.

Различие форм задания МК обуславливает целесообразность форми-

рования полных систем уравнений комплексов в смешанном координатном базисе. Для этого в работе применен смешанный контурно-узловой метод. Причем с целью универсальности системы в матричной форме сформированы для комплексов с обобщенными НКВ, что позволило распространить их на множество реальных частных случаев.

Полные системы уравнений использованы для всестороннего анализа комплексов при различных уровнях абстракции аналитическим, численно-аналитическим и численным методами. В основу первых двух методов положены гармонический анализ, кусочно-линейная аппроксимация характеристик нелинейных элементов, элементы теории дифференциальных уравнений и алгоритмы численного решения систем нелинейных алгебраических уравнений. Численный метод составляет основу цифровых моделей комплексов, реализующих автоматизированное формирование полных систем уравнений, сведение их к уравнениям состояния для каждого интервала постоянства структуры схем и решение последних с помощью алгоритма Рунге-Кутты четвертого порядка.

Достоверность теоретических положений, выводов и рекомендаций подтверждена экспериментальными исследованиями на физических моделях и осуществленных промышленных комплексах.

Научная новизна. Предложенный в работе алгоритм построения явился теоретической предпосылкой для осуществления нового класса высокоэффективных СКВ, НКВ и ПССКВ, позволяющего, в отличие от традиционных КВ, включение КУ со стороны низшего, среднего и высшего напряжений преобразовательного трансформатора и использующего для выполнения искусственной коммутации вентилей нечетнократные гармоники токов, образующих преобразователь блоков.

Выполненные автором приближенные аналитические исследования комплекса с обобщенным НКВ позволили в равных условиях при мгновенной коммутации вентилей сопоставить широкий круг имеющих практическое значение преобразователей по основным техническим характеристикам и определить во всем его многообразии место предложенных КВ.

Разработанная автором теория квазиустановившихся электромагнитных процессов в комплексе с НКВ, базирующаяся на реальных коммутациях вентилей, описываемых дифференциальными уравнениями связанных контуров первого и второго порядка с дискретно изменяющейся по гармоническому закону индуктивной связью, представляет собой основу для создания преобразователей с высокими энергетическими показателями при достаточно глубоком и плавном регулировании выпрямленного напряжения.

Представленная в работе обобщенная теория квазиустановившихся

процессов в комплексе с СКВ при параллельной работе преобразовательных блоков впервые описывает характеристики и свойства рассматриваемых преобразователей с учетом конструктивной асимметрии блоков и впервые вскрытых резонансных явлений в контуре УТ.

В работе показаны возможности известных и вновь предложенных способов регулирования и стабилизации параметров электрического режима в нагрузке, питаемой от рассматриваемых СКВ, НКВ и ПССКВ.

Разработанные в диссертации цифровые модели и полученные с их помощью результаты моделирования впервые дают полное представление о сложных статических, а также эксплуатационных и аварийных динамических процессах в комплексах "ПС-СКВ-Н", "ПС-НКВ-Н" и "ПС-ПССКВ-Н", построенных на базе предложенных преобразователей.

Практическая ценность. использование новых научных положений, обоснованных в диссертационной работе, служит теоретической базой для создания новых перспективных преобразовательных систем электропитания установок электротехнологии и транспорта с высокими энергетическими показателями. Разработанная инженерная методика расчета и результаты проведенных исследований позволяют выбрать рациональные схемные решения, способы управления, параметры и характеристики предложенного класса КВ.

Основные положения, выносимые на защиту:

- алгоритм построения и схемные решения нового класса компенсированных выпрямителей с фильтрацией в коммутирующие конденсаторы нечетнократных гармоник токов преобразовательных блоков;
- приближенный сравнительный анализ основных технических характеристик предложенных КВ;
- теория квазиустановившихся электромагнитных процессов в комплексе "ПС-НКВ-Н";
- обобщенная теория квазиустановившихся электромагнитных процессов в комплексе "ПС-СКВ-Н" с постоянной и переменной составляющими УТ при параллельном включении преобразовательных блоков;
- способы регулирования и стабилизации напряжения и тока нагрузки;
- цифровые модели и анализ динамики комплексов "ПС-СКВ-Н", "ПС-НКВ-Н" и "ПС-ПССКВ-Н";
- инженерная методика расчета и практические разработки КВ.

Реализация результатов работы. Первый КВ с фильтрацией в коммутирующие конденсаторы нечетнократных гармоник токов преобразовательных блоков по а.с. № И124414 при руководстве и непосредственном

участии автора введен в эксплуатацию в 1987 г. на Челябинском электролитном цинковом заводе для питания электролизных серий цинка. Выходные параметры агрегата - 12500 А, 850 В. В 1988 г. эта работа на Всесоюзном конкурсе по экономии электрической и тепловой энергии удостоена четвертой премии (регистрационный № 430). Положительный опыт эксплуатации КВ позволил в 1989 и 1990 гг. на том же заводе внедрить второй и третий подобные агрегаты.

В соответствии с указанными выше директивными документами совместно с НПО "Уралэлектротяжмаш" г.Свердловск разработаны КУ с фильтрацией в коммутирующие конденсаторы преимущественно пятой и седьмой гармоник токов шестифазных блоков вновь создаваемых агрегатов с параметрами 31500 А, 900 В для алюминиевой подотрасли Минмета СССР. Представленные в диссертации инженерная методика и цифровые модели в объединении внедрены в практику проектирования КВ. Начало освоения широкого промышленного производства КУ намечено на 1991 г. С НПО "Уралэлектротяжмаш" готовятся к внедрению первые промышленные комплексы "ПС-ПССКВ-Н" на Саянском алюминиевом заводе и продолжается разработка НКВ для преобразовательных подстанций МПС СССР.

Совместно с ПО "Уралэнергоцветмет" г.Свердловск ведется разработка серийных КУ для тиристорных СКВ и диодно-тиристорных НКВ с выпрямленными токами от 12500 до 31500 А и напряжениями от 150 до 900 В. Первые тиристорные СКВ с параметрами 12500 А и 850 В будут введены в эксплуатацию на Богословском алюминиевом заводе в 1990 г.

Общий подтвержденный экономический эффект от эксплуатируемых КВ, внедренных инженерной методики и цифровых моделей составляет 409,2 тыс.руб. Ожидаемый годовой эффект от применения КУ в агрегатах 31500 А, 900 В алюминиевой промышленности - 1,6 млн.руб., а в преобразователях 12500 А, 850 В Богословского алюминиевого завода - 256 тыс.руб.

Апробация работы. Основные материалы диссертации и ее отдельные положения докладывались и обсуждались на научно-технической конференции "Повышение эффективности устройств преобразовательной техники" (г.Киев, 1972 г.), на УШ научно-технической конференции по вопросам автоматизации производства (г.Томск, 1974 г.), на производственно-техническом семинаре "Перспективы применения полупроводниковой преобразовательной техники в промышленности" (г.Челябинск, 1977 г.), на IV Всесоюзной научно-технической конференции электродной промышленности "Мероприятия по повышению качества и эксплуатационной стойкости углеродной продукции" (г.Челябинск, 1978 г.), на

Всесоюзном научно-техническом семинаре "Основные направления создания и совершенствования энерготехнологического оборудования на предприятиях цветной металлургии" (г.Москва, 1979 г.), на Всесоюзной научно-технической конференции "Проблемы нелинейной электротехники" (г.Киев, 1981 г.), на научно-техническом семинаре "Пути улучшения энергетических и массо-габаритных показателей мощных полупроводниковых выпрямителей" (г.Челябинск, 1981 г.), на III и IV Всесоюзных научно-технических конференциях "Проблемы преобразовательной техники" (г.Киев, 1983 и 1987 гг.), на Всесоюзном научно-техническом совещании "Преобразовательная техника в энергетике" (г.Ленинград, 1984 г.), на научно-технической конференции "Пути улучшения энергетических и массо-габаритных показателей полупроводниковых преобразователей" (г.Челябинск, 1985 г.), на Третьем Всесоюзном научно-техническом совещании "Проблемы электромагнитной совместимости силовых полупроводниковых преобразователей" (г.Таллин, 1966 г.), на Всесоюзных научно-технических совещаниях "Применение вычислительной техники для исследования и автоматизации проектирования преобразователей" (г.Саранск, 1987 г. и г.Николаев, 1989 г.), на I Всесоюзной конференции по теоретической электротехнике (г.Ташкент, 1967 г.), на II Всесоюзной научной конференции "Пути экономии и повышения эффективности использования электроэнергии в системах электроснабжения промышленности и транспорта" (г.Смоленск, 1967 г.), на Втором Всесоюзном совещании "Улучшение электромагнитной совместимости электрических полупроводниковых преобразователей как средство экономии материальных и энергетических ресурсов" (г.Москва, 1988 г.), на V и VI Всесоюзных научно-технических конференциях "Силовая полупроводниковая техника и ее применение в народном хозяйстве" (г.Запорожье, 1985 г. и г.Челябинск, 1989 г.), на семинарах "Электрические цепи с вентильными элементами" Научного Совета АН УССР по комплексной проблеме "Научные основы электроэнергетики" (г.Киев, 1983 и 1990 гг.), на научном семинаре кафедры "Промышленная электроника" МЭИ (г.Москва, 1990 г.), на научном семинаре кафедры электротехники ЛИТМО (г.Ленинград, 1990 г.), на ряде отраслевых совещаний Минмета и Минэлектротехприбора СССР.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 88 печатных работ (из них 20 без соавторов), в т.ч. один информационный листок о научно-техническом достижении, 60 статей и докладов. Приоритет основных технических решений, предложенных и разработанных в диссертации, защищен 27 авторскими свидетельствами СССР.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы из 252 наименований и приложений. Общий объем работы составляет 580 страниц, из них 303 страницы основного текста, 101 страница рисунков, 3 страницы таблиц, остальные – приложения (материалы о внедрении, алгоритмы и распечатки программ, вспомогательные результаты исследований).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы, сформулированы цель и задачи диссертации, а также основные положения, выносимые на защиту, дана информация о структуре работы, апробации, публикации и внедрении результатов исследований в народное хозяйство.

В первой главе рассмотрено состояние и показаны направления новых исследований в области КВ для питания установок электротехнологии и транспорта. Во временной и спектральной областях описан принцип работы комплекса с элементарным двухфазным НКВ и введены необходимые в последующем понятия и определения. Показаны пути реализации комплексов с многофазными НКВ. Обоснована перспективность выполнения подобных комплексов на базе СКВ с фильтрацией в коммутирующие конденсаторы КУ нечетнократных гармоник входных токов $p/2$ -фазных преобразовательных блоков, образующих p -фазный СКВ. На входных токи, представляющие собой фазные токи приведенной к трем фазам $p/2$ -фазной системы несинусоидальных вентиляльных токов блоков, наложено ограничение, определяющее их спектр гармониками порядка $k = S p/2 \pm 1$, $S = 0, 1, 2, 3, \dots$. Значениям $S = 0, 2, 4, \dots$ отвечают четнократные, а $S = 1, 3, 5, \dots$ – нечетнократные гармоники входных токов блоков.

Сформулирован алгоритм построения, общий для всего класса исследуемых СКВ, в которых для одноступенчатой искусственной коммутации вентилялей используются нечетнократные гармоники. Суть алгоритма составляют следующие преобразования частотных спектров входных токов блоков:

1. При сохранении порядка работы вентилялей осуществляют сдвиг мгновенных значений входных токов блоков на угол $\pm \frac{2\pi}{p}$. При этом фазовые сдвиги одноименных гармоник этих токов становятся равными

$$\Delta \varphi_{k\pi} = \varphi_{k\pi} - \varphi_{2k\pi} = \pm \frac{2\pi}{p} k\pi = \pm \pi \left(S \pm \frac{2}{p} \right).$$

2. Проводят корректировку фазовых сдвигов в сторону восстановления совпадения первых гармоник на углы $\pm \frac{2\pi}{p} \left(\pi - S \frac{p}{2} \right)$. После

корректировки фазовые сдвиги составляют:

$$\Delta \Psi_{\pi_{II}} = \pm \frac{2\pi}{\rho} \pi + \frac{2\pi}{\rho} (\pi - S \frac{\rho}{2}) = \pm \pi S.$$

3. Результирующий спектр в виде суммы синфазных четнократных гармоник входных токов блоков направляют в питающую сеть.

4. Выполняют инвертирование спектра тока одного блока по отношению к другому. После инвертирования углы сдвига фаз одноименных гармоник токов блоков определяются соотношением:

$$\Delta \Psi_{\pi_{II}} = \pm \pi S \pm \pi = \pm \pi (S+1).$$

5. Результирующий спектр, определяемый синфазными нечетнократными гармониками входных токов блоков, направляют в коммутирующие конденсаторы КУ.

6. Осуществляют согласование коммутирующего напряжения, создаваемого отфильтрованными нечетнократными гармониками токов, с номинальным напряжением конденсаторной батареи КУ.

В данной главе представлены схемные решения семи базовых вариантов двенадцатифазных мостовых СКВ, в которых, в соответствии с алгоритмом построения, в коммутирующие конденсаторы фильтруются преимущественно пятые и седьмые гармоники токов шестифазных блоков с помощью КУ, включаемых соответственно в цепи обмоток НН головного понижающего трансформатора подстанции, сетевых, компенсационных и вентильных обмоток преобразовательного трансформатора, между вентильными обмотками и выпрямительными мостами и непосредственно в выпрямительные мосты.

В качестве примера на рис. 1 иллюстрируется принципиальная схема первого промышленного СКВ с пятой и седьмой гармониками тока в конденсаторах. КУ в виде реактора R_k и конденсаторной батареи К в этом варианте включено в рассечку ошиновки, связывающей вентильные обмотки T_2 и T_3 преобразовательного трансформатора Т с выпрямительными мостами ВМ1 и ВМ2. На рис. 2 показано иное исполнение КУ, включаемого в ту же точку СКВ. В обоих случаях операции 1 - 3 алгоритма осуществляются с помощью трансформатора Т, а операции 2, 4 - 6 - с помощью реактора R_k .

В этой главе показаны пути выполнения имеющих важное практическое значение производных вариантов СКВ на основе нулевой схемы преобразования, специальных конструкций преобразовательного трансформатора с магнитными шунтами, дополнительными стержнями и пространственными магнитопроводами. Отмечены направления увеличения фаз-

ности преобразования и построения НКВ.

Для получения обобщающих результатов в работе рассматриваются два комплекса "ПС-НКВ-Н" с последовательным и последовательно-параллельным соединением выпрямительных мостов, принципиальные однолинейные схемы которых показаны на рис. 3 и 4. Пунктиром выделены МК, отвечающие питающей сети (ПС), преобразовательному трансформатору (Т), конденсаторной батарее (К) и реактору (Рк) компенсирующего устройства, уравнительным реакторам (P'_y и P''_y), выпрямительным группам (B' и B''), нагрузке (Н). Обобщенный характер комплексам придает наличие в НКВ трех видов несимметрии. Несимметрия силовой схемы задана отличием в Q раз коэффициентов трансформации для обмоток T_2 , T_3 и T_4 , T_5 трансформатора. Несимметрия включения КУ обеспечена введением его лишь в группу B'' . Несимметрия управления реализована независимым раздельным управлением тиристорами групп B' и B'' .

В первой главе получены матричные уравнения всех МК комплексов, даны сведения о смешанном контурно-узловом методе и с помощью нормальных деревьев графов электрических цепей комплексов, построенных с приоритетом YZ , сформирована единая для них полная система, которая в матричной форме имеет вид:

$$T_{ky} V_{ky} = F_{ky}. \quad (1)$$

Подматрицы матрицы T_{ky} определяются параметрами МК и коэффициентами инцидентности $Y(Z)$ подребер контурам (сечениям). Искомые величины, входящие в вектор V_{ky} , представляют собой токи Z -связей и напряжения Y -ветвей дерева. Матрица F_{ky} содержит контурные ЭДС главных контуров и узловые токи главных сечений. Топологические особенности комплексов по схемам на рис. 3 и 4 учтены подматрицами, входящими в T_{ky} .

С целью представления всех характеристик комплексов в относительной форме в работе используются следующие введенные в первой главе базисные величины

$$U_B = \frac{3}{2\pi} h_1 (1+Q) E_{km}''; \quad I_B = h_2 \frac{E_{km}''}{X_{k''}},$$

где h_1 (h_2) - число последовательно (параллельно) включенных элементарных коммутирующих групп в МК B' и B'' ; E_{km}'' и $X_{k''}$ - амплитуда коммутирующей ЭДС и индуктивное сопротивление контура коммутации в МК B'' .

Во второй главе исследование комплексов "ПС-НКВ-Н" выполнено

при допущениях первого уровня абстракции, предполагающих мгновенную коммутацию вентилях. Задачей приближенного анализа было получение из системы (1) аналитическим методом наиболее обобщимых соотношений, определяющих характеристики обобщенных комплексов, и проведение на их основе сопоставления свойств симметричных и несимметричных, компенсированных и некомпенсированных управляемых выпрямителей. В результате появилась возможность для обоснованного выбора направлений совершенствования комплексов и развития в следующих главах их теории. Кроме того, отдельные результаты, полученные при допущениях первого уровня, непосредственно использованы при дальнейшем углубленном исследовании комплексов.

Регулировочные свойства и влияние различных НВ и КВ на питающую сеть как потребителей реактивной мощности определяются уравнением связи коэффициента сдвига первых гармоник напряжения и тока сети ($\cos \varphi$) с глубиной регулирования выпрямленного напряжения (ΔU_{d*})

$$\cos \varphi = (1+q)(1-\Delta U_{d*}) / \sqrt{1+q^2+2q \cos(\alpha' - \alpha'')}, \quad (2)$$

где α' и α'' - углы включения вентилях в группах В' и В''.

Из анализа (2) следует, что хорошие регулировочные возможности симметричных НВ сопряжены с наиболее резким изменением $\cos \varphi$, который линейно снижается с возрастанием глубины регулирования. Поэтому такие НВ являются потребителями значительной реактивной мощности.

В СКВ линейная зависимость между $\cos \varphi$ и ΔU_{d*} сохраняется. Однако появляется возможность работы в области с опережающим углом сдвига фаз. При увеличении угла задержки включения вентилях относительно точки их естественного вступления в работу в КВ выпрямленное напряжение в этой области не уменьшается, а увеличивается. Переход из области с генерированием в область с потреблением реактивной мощности связан с нарушением монотонности регулировочных характеристик. Для сохранения монотонности при малой мощности КУ целесообразно работать с такими α'' , которые лишь нейтрализуют влияние реальных коммутационных процессов (углов γ''). В обеих областях в силу указанной линейной связи фазовое регулирование следует применять лишь в весьма узком диапазоне. Для расширения диапазона изменения тока, напряжения, мощности потребителя необходимо использовать комбинированные способы, дополняя фазовое управление дискретным трансформаторным регулированием, или применять методы параметрической стабилизации, рассмотренные в пятой главе.

Поддерживать высокие значения $\cos \varphi$ при регулировании $U_{\text{сн}}$ в достаточно широких пределах позволяют НКВ. Это, с одной стороны, связано с максимальным проявлением положительного эффекта искусственной коммутации в группе В'', работающей без задержки включения вентилей, а с другой стороны, - с рекуперацией (сбросом) части активной мощности в питающую сеть с помощью группы В', переходящей в инверторный режим, вместо адекватного перехода активной мощности в реактивную в СКВ. При приближении α' к 180° величина $\cos \varphi$ стремится ко второму максимуму, а $U_{\text{сн}}$, изменяющееся в процессе регулирования монотонно, - к минимуму.

Для исследования гармонического воздействия различных преобразователей на питающую сеть и нагрузку установлены мгновенные, действующие значения и спектры сетевого тока и выпрямленного напряжения в комплексах с НКВ, а также их интегральные показатели - коэффициент и мощность искажения, коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения. Вскрыто явление интерференции высших гармоник в сетевом токе и в напряжении нагрузки рассматриваемых комплексов. Показано, что несимметрия КВ существенно улучшает качественные показатели электроэнергии как на входе, так и на выходе преобразователя.

Рассмотрен вопрос об условиях работы и типовой мощности преобразовательных трансформаторов комплексов. Показано, что в процессе регулирования в НКВ существенно разгружаются по току сетевые, а в автотрансформаторных вариантах и вентильные обмотки трансформаторов. В последнем случае при выполнении групп В' и В'' по нулевым схемам НКВ по типовой мощности трансформатора занимает промежуточное положение между выпрямителями с мостовой и нулевой (при трансформаторной связи вентильных обмоток) схемами преобразования.

В этой же главе установлено, что для преобразователей с шестифазными блоками, напряжения на конденсаторах которых преимущественно определяются пятой и седьмой гармониками тока, схемным параметром, задающим свойства всего рассматриваемого класса СКВ и компенсированных частей НКВ, является величина

$$\psi = \pi(2 - \sqrt{3}) / \pi. \quad (3)$$

Максимальный угол опережения включения вентилей в компенсированной диодной группе В'', определенный из условия появления режима с пов-торной проводимостью, равен

$$\alpha''_{\text{max}} = -\arctg(1/2\sqrt{3}) = -15,1^\circ. \quad (4)$$

0399639

С учетом (4) установленная мощность трансформаторного оборудования КУ, приведенная к частоте питающей сети, в зависимости от схемного варианта КВ составляет порядка 5 – 10 %, а аналогичная мощность конденсаторной батареи во всех вариантах – порядка 1,5 % от мощности, преобразуемой группой В".

В третьей главе представлена теория квазиустановившихся электромагнитных процессов в основных режимах работы комплексов "ПС-НКВ-Н" с учетом реального характера коммутаций вентилей в выпрямительных группах В' и В". Все соотношения установлены из системы (I) при втором уровне абстракции, предполагающем обычные для мощных преобразователей допущения. Рассмотрены комплексы, в которых УТ либо полностью отсутствует (рис. 3), либо за счет действия уравнивающих реакторов P_u' и P_u'' (рис. 4) пренебрежимо мал. Для регулирования напряжения на нагрузке использована группа В'. Группа В" работает в неуправляемом компенсированном режиме без задержки включения вентилей.

Электромагнитные процессы в комплексах определяются рядом режимных модулей, каждый из которых характеризуется тремя повторяющимися от модуля к модулю режимами. Показано, что в наиболее общих структурных состояниях НКВ в каждом модуле процессы передачи тока с предыдущего вентиля на очередной подчиняются дифференциальным уравнениям индуктивно связанных контуров первого и второго порядков (рис. 5) с индуктивной связью, изменяющейся по дискретно-гармоническому закону при возрастании номера режимного модуля ρ . Этим состояниям отвечают режимы перекрытия коммутационных процессов в группах В' и В". Процесс передачи тока начинается в контуре коммутации группы В" (ключ K_2 замыкается). Далее начинается коммутация в группе В' (замыкается ключ K_1), коммутационные процессы в В' и В" протекают одновременно. После окончания коммутации в В' (ключ K_1 размыкается) завершается процесс передачи тока в группе В" (ключ K_2 остается замкнутым). Записав решения дифференциальных уравнений и удовлетворив их граничным условиям, используя метод припасовывания, получаем систему семи уравнений, определяющих шесть постоянных интегрирования и выпрямленный ток. В векторной форме она имеет вид:

$$B(\alpha', \gamma', \alpha'', \gamma'', \nu, \mathcal{L}, \mathcal{E}) [A_{11K}, A_{12K}, A_{21K}, A_{22K}, A_{31K}, A_{32K}, I_{dK}] = \quad (5)$$

$$= F(\alpha', \gamma', \alpha'', \gamma'', \nu, \mathcal{L}, \mathcal{E}),$$

где ν – относительная собственная частота контура коммутации в группе В" при разомкнутом K_1 ;

\mathcal{K} - коэффициент связи контуров коммутации в группах B' и B'' .
 Для доопределения системы (5) получено два дополнительных уравнения, устанавливающих угол коммутации γ' в B' и угол α'' в B'' .
 Эти уравнения имеют вид:

$$f_1(\alpha', \gamma', \gamma, \mathcal{K}, \mathcal{L}, A_{21K}, A_{22K}, I_{dK}) = 0; \quad (6)$$

$$f_2(\alpha'', \gamma, A_{11K}, A_{12K}, I_{dK}) = 0. \quad (7)$$

Первое соотношение отвечает равенству $I_{K'}$ в конце коммутации выпрямленному току моста, а второе - равенству нулю напряжения на вентиле группы B'' в момент $\gamma' = \alpha''$. Разработан алгоритм численного решения системы (5) - (7) с использованием метода Ньютона-Канторовича, реализованный в общей программе численно-аналитического исследования всех характеристик комплексов.

Двумя другими режимами модулей являются - режим без взаимовлияния коммутационных процессов в B' и B'' (ключи K_1 и K_2 замыкаются поочередно, причем замкнутое состояние одного из них соответствует разомкнутому другому) и режим воздействия коммутационных процессов в B' на аналогичные процессы в B'' без перекрытия во времени. В первом и втором модулях последний режим сопровождается задержкой, а в четвертом и пятом - опережением включения вентилей в группе B'' . В третьем модуле, в силу равенства нулю магнитной связи контуров, этот режим отсутствует. Кроме того, в первом модуле возникает режим задержки включения вентилей в B' незакончившимся процессом коммутации в B'' (ключ K_1 получает возможность замыкания сразу же после размыкания K_2). Для описания необходимых характеристик в комплексах "ПС-НКВ-Н" в режимах без перекрытия коммутаций развиты основные положения известной теории СКВ.

На рис. 6 показаны области основных режимов работы комплексов с НКВ. Зоны режимов без взаимовлияния коммутационных процессов выделены штриховкой. Режимы с полным перекрытием коммутаций имеют место в областях между пунктирными линиями. В остальных областях наблюдаются режимы с задержкой и опережением включения вентилей, а также с частичным перекрытием коммутаций. Режим задержки в B' в первом модуле существует в незаштрихованной зоне, примыкающей к $\alpha' = 0$. Штрихпунктирными линиями обозначены границы устойчивой работы группы B' в инверторном режиме с углом запаса $\delta_3' = 10^\circ$ и повторного включения неуправляемых вентилей группы B'' в непроводящую часть периода. Как видно из рис. 6, основные свойства комплексов "ПС-НКВ-Н" определяются преимущественно режимами без взаимовлия-

ния и полного перекрытия коммутационных процессов в группах В' и В''.

В работе получены соотношения, определяющие мгновенные, действующие значения и спектры токов и напряжений на элементах комплексов, внешние и энергетические характеристики в точках подключения нагрузки, НКВ и синусоидальных ЭДС. На рис. 7 приведены внешние характеристики. Они начинаются со значения $\alpha' = 10^\circ$, поскольку к этой величине, как следует из рис. 8, приближается при $\nu = 6$ задержка включения вентилях МК В' в первом режимном модуле. Характеристики с α' , кратными 30° , определяются полностью режимами перекрытия коммутаций. Исследована зависимость их от степени магнитной связи контуров коммутации в группах В' и В''. Вариация \mathcal{L} во всем теоретически возможном диапазоне (рис. 9) показала, что отклонения выпрямленного напряжения от случая независимой работы групп В' и В'' находятся на уровне, не превышающем 0,5%. Причем первому и второму модулям соответствует снижение, третьему - неизменность, а четвертому и пятому - повышение напряжения. Важным моментом является то, что введение КУ позволяет повысить жесткость внешних характеристик по сравнению с некомпенсированным режимом (пунктирные характеристики). Это особенно актуально для преобразователей, питающих магистральный железнодорожный транспорт.

Не менее важным является то обстоятельство, что процесс плавного регулирования выпрямленного напряжения обеспечивается при высоких энергетических показателях комплекса. На рис. 10 иллюстрируются зависимости коэффициента сдвига первых гармоник напряжения и тока от I_{d*} в точке приложения синусоидальных ЭДС питающей сети. Из кривых следует, что при глубине плавного регулирования 25% величина $\cos\varphi$ поддерживается практически в диапазоне 0,96 - 1. В комплексах с некомпенсированными выпрямителями коэффициент сдвига снижается весьма существенно (пунктир с $\nu = 0$, $\alpha' = 0$). Штриховкой обозначены диапазоны изменения $\cos\varphi$ при учете взаимодействия групп В' и В'' в режимах с перекрытием коммутаций (пунктирные кривые отвечают независимой работе). Как видно и здесь указанное взаимодействие сказывается достаточно слабо.

Зависимостями амплитуд гармоник сетевого тока от α' (рис. 11) подтверждается явление их интерференции при реальной длительности коммутационных процессов в В' и В''.

Проведенные в данной главе исследования показали перспективность использования НКВ в комплексах с относительно большой глубиной плавного регулирования выходного напряжения, например, для пи-

тания тяговой нагрузки.

Четвертая глава посвящена разработке обобщенной теории квази-установившихся электромагнитных процессов в рабочих режимах комплексов "ПС-СКВ-Н" с параллельным по отношению к нагрузке соединением преобразовательных блоков. В двенадцатифазном преобразователе, в силу всегда имеющей место конструктивной асимметрии параметров (неизбежно нестрогие витковые соотношения и различия сопротивлений обмоток преобразовательных трансформаторов, конструктивная несимметрия ошиновки и др.) и сдвига на 30 эл.град. мгновенных значений выпрямленных напряжений блоков, образуется контур протекания как постоянной, так и переменной составляющих УТ. Необходимость дальнейшего углубления теории диктуется вновь вскрытыми реально сказывающимися на процессы явлениями, связанными с наличием УТ, и вытекающими из них возможностями предложенных СКВ. Развитие теории осуществлено в двух направлениях.

Первое направление связано с учетом постоянной составляющей УТ в комплексе с конструктивно асимметричным КВ. Анализ электромагнитных процессов выполнен при допущениях третьего уровня, предполагающих наличие асимметрии при идеальной сглаженности выпрямленных токов как всего КВ так и его шестифазных блоков. В качестве показателей конструктивной асимметрии приняты относительные отклонения от средних значений коэффициентов трансформации λ_* и реактансов коммутации \mathcal{X}_* блоков. Наличие асимметрии приводит к различию углов включения и коммутации блоков, а следовательно, и удвоению длительности интервала повторяемости процессов.

Используя систему (I), показано, что коммутационные процессы в блоках описываются идентичными дифференциальными уравнениями второго порядка, различающимися лишь величинами коммутирующих ЭДС трансформатора, коммутирующих напряжений конденсаторов и собственных частот контуров коммутации. После записи решений и их припасовывания с учетом законов коммутации и граничных условий получена система шести уравнений, связывающая четыре постоянных интегрирования и два выпрямленных тока блоков вида:

$$B(\alpha_j, \gamma_j, \nu_{cp}, \lambda_*, \mathcal{X}_*) [A_{j1*}, A_{j2*}, I_{dj*}] = F(\alpha_j, \gamma_j, \nu_{cp}, \lambda_*, \mathcal{X}_*), j=1,2. \quad (8)$$

Система (8) доопределена тремя уравнениями:

$$f_1(A_{11*}, A_{12*}, \alpha_1, \nu_{cp}, \lambda_*, \mathcal{X}_*) = 0; \quad (9)$$

$$f_2(A_{21*}, A_{22*}, \alpha_2, \nu_{cp}, \lambda_*, \mathcal{X}_*) = 0; \quad (10)$$

$$f_3(A_{j1k}, A_{j2k}, I_{dj1k}, \alpha_j, \gamma_j, \gamma_{cp}, n_k, x_k) = 0, \quad (II)$$

устанавливающими углы включения вентилях в обоих блоках и угол коммутации в одном из них (другой угол коммутации варьируется в расчете). Уравнения (9) и (10) получены из условия перехода через нулевое значение напряжений на вентилях блоков в моменты α_1 и α_2 . Уравнение (II) отвечает равенству выпрямленных напряжений блоков.

Разработан алгоритм численно-аналитического исследования комплексов с конструктивно асимметричными КВ, базирующийся на решении системы (8) - (II) с помощью подпрограммы ЕС ЭВМ - *DS NEN* с заданием начального приближения, соответствующего конструктивно симметричному КВ.

Установлено, что конструктивная асимметрия в комплексе с некомпенсированным выпрямителем сопровождается появлением значительной величины постоянной составляющей УТ. Поэтому преобразовательные блоки загружаются по току неравномерно, что приводит к недоиспользованию установленной мощности всего агрегата. Для ликвидации этого недостатка на практике приходится использовать дополнительные уравнивающие средства.

Исследование комплекса с СКВ указало на его весьма важное свойство жестко выравнивать выпрямленные токи блоков без применения дополнительных средств. Это проявляется как при асимметрии реактансов, так и коэффициентов трансформации. В качестве примера на рис. 12 представлены зависимости небаланса токов блоков в СКВ, отнесенного к той же величине в некомпенсированном преобразователе при $x_* = 0$ и асимметрии коэффициентов трансформации. При изменении n_* до 5 % асимметрия практически не сказывается на приведенных зависимостях. В зоне рабочих токов нагрузки и собственных частот небаланс токов в СКВ ничтожен.

Второе направление обобщения теории связано с учетом переменной составляющей УТ в комплексе с конструктивно симметричным КВ. Электромагнитные процессы исследованы при допущениях четвертого уровня, предполагающих полную сглаженность лишь у выпрямленного тока всего СКВ и допускающих наличие активных сопротивлений в ветвях комплекса. Из анализа в этих условиях системы (I) установлено, что процессы в комплексе определяются не одним, как в СКВ без УТ, и двумя, как в СКВ с постоянной составляющей УТ, а тремя контурными дифференциальными уравнениями, а также тремя группами контурных переменных и параметров ($j = 1, 2$ и 3), отвечающих соответственно

контуру коммутации, контуру УТ в коммутационном и контуру УТ во внекоммутационном интервалах. Все три уравнения сведены к виду:

$$\rho^2 U_j + 2\sigma_j \rho U_j + \gamma_j^2 U_j = \gamma_j^2 E_j, \quad (12)$$

где γ_j и σ_j - относительные величины собственных частот незатухающих колебаний и показатели затухания контуров;

E_j и U_j - комбинации ЭДС сети и напряжений конденсаторов.

Записав решения уравнений (12) и осуществив их сопряжение, получаем систему семи трансцендентных уравнений, определяющую шесть постоянных интегрирования и ток нагрузки, вида:

$$B(\alpha, \gamma, \sigma, \omega_{j*}) [A_{j1*}, A_{j2*}, I_{d*}] = E(\alpha, \gamma, \sigma, \omega_{j*}), \quad (13)$$

где $\omega_{j*} = \omega_j / \omega_1$ - относительная величина индуктивного сопротивления соответствующего контура.

Система (13) доопределена одним уравнением

$$f(\alpha, \gamma, \sigma, \omega_{j*}) = 0, \quad (14)$$

соответствующим равенству нулю напряжения на вступающем в работу вентиле.

В работе установлены выражения для мгновенных, действующих значений и спектров токов и напряжений на элементах комплекса, а также необходимые соотношения, определяющие внешние и энергетические характеристики. Анализ всех характеристик выполнен численно-аналитическим методом. На языке ФОРТРАН реализована программа расчета характеристик, в основу которой положен алгоритм решения системы (13), (14).

Второй порядок дифференциального уравнения контура УТ говорит о резонансной зависимости переменной составляющей тока этого контура как от индуктивного, так и емкостного сопротивлений. На рис.13 представлены рассчитанные на ЭВМ зависимости амплитуды УТ от индуктивного сопротивления ω_{3*} при вариации γ_1 . Приведенные зависимости показывают, что в отличие от НВ ($\gamma_1 = 0$), у которого прерывистый режим наблюдается в области ω_{3*} , близких к нулю, а снижение амплитуды УТ возможно лишь при наращивании ω_{3*} (например, за счет увеличения мощности реактора P_y), в СКВ указанный режим всю область изменяемого параметра разбивает на две зоны - дорезонансную и послерезонансную. Емкость конденсаторов КУ (величина γ_1) является вторым параметром, управляющим амплитудой УТ. Причем в на-

и более важных практических случаях с максимальным совмещением трансформаторного и вентиляльного оборудования (минимальное α_{3*}) появляется возможность снижения УТ по сравнению с НВ без дорогостоящего увеличения α_{3*} . Результаты цифрового и физического моделирования показали, что к резкому снижению переменной составляющей УТ приводит также переход СКВ в режим с повторной проводимостью вентилялей. Эти положения использованы в предложенном автором способе уменьшения УТ.

Величиной емкости конденсаторов КУ определяются все характеристики СКВ. На рис. 14 и 15 представлены внешние характеристики и зависимости тангенса угла сдвига фаз в точке подключения синусоидальных ЭДС от тока нагрузки при отсутствии переменной составляющей УТ ($\alpha_{3*} = \infty$). Они показывают, что с повышением ψ потребляемая СКВ реактивная мощность снижается, а при ψ , превышающей 6, появляется возможность ее генерирования в сеть. Одновременно имеет место повышение, а в последующем некоторое снижение жесткости внешних характеристик СКВ. Штрихпунктирными линиями на характеристиках обозначены границы основного режима, определяемые из условий достижения углом коммутации периода повторяемости процессов или перехода СКВ в режим с повторной проводимостью вентилялей. Границы показаны для максимально возможного для основного режима диапазона тока, соответствующего отсутствию индуктивной и кондуктивной связи блоков ($\alpha_{2*} = 0$). При наличии связи область основного режима несколько сужается.

На рис. 16 и 17 те же характеристики приведены для $\psi = 6$ и вариации α_{3*} в широких пределах. Резонансные явления в контуре УТ проявляются на всех характеристиках СКВ. Из приведенных зависимостей следует, что в дорезонансной зоне наличие УТ снижает выпрямленное напряжение и повышает $tg \varphi$. В послерезонансной зоне картина обратная. Это связано не только с амплитудным, но и фазовым проявлением резонанса - при переходе через зону резонанса фаза переменной составляющей УТ опрокидывается. При удалении от резонанса как в дорезонансной, так и послерезонансной зонах, свойства СКВ все точнее определяются характеристиками, полученными при отсутствии УТ. Представленные на рис. 13, 16 и 17 кривые позволяют судить о степени влияния на процессы потерь энергии в комплексе.

Показано, что в дорезонансной зоне эффективность работы конденсаторной батареи КУ преимущественно определяется седьмой, а в послерезонансной - пятой гармониками тока.

Все полученные в данной главе результаты подтверждены экспери-

ментальными исследованиями на физических моделях СКВ и реальных промышленных комплексах.

В пятой главе вскрыты возможности существующих и вновь предложенных автором способов регулирования и стабилизации параметров электрического режима в нагрузке рассматриваемых комплексов.

При допущениях второго уровня абстракции с учетом (3) рассчитаны внешние и энергетические характеристики комплекса с СКВ при симметричном тиристорном управлении. Показано, что при реальной длительности коммутационных процессов плавное регулирование выпрямленного напряжения может осуществляться в областях как с потреблением, так и с генерированием реактивной мощности. Подтвержден ранее сделанный вывод о целесообразности такого регулирования в узком диапазоне, например, для поддержания тока в электролизных сѐриях алюминия при возникновении анодных эффектов.

На основе разработанной в третьей главе теории квазиустановившихся электромагнитных процессов осуществлен анализ регулировочных возможностей НКВ в зависимости от собственной частоты контура коммутации в группе В" и степени несимметрии силовой схемы в контексте с вопросом потребления преобразователем реактивной мощности. Повышение собственной частоты снижает потребляемую реактивную мощность. Увеличение напряжения группы В' расширяет диапазон регулирования, снижая коэффициент сдвига НКВ.

Впервые исследованы электромагнитные процессы и установлены характеристики диодных СКВ с пятой и седьмой гармониками тока в конденсаторах, управляемых дросселями насыщения. Предложены новые способы магнитного управления СКВ, повышающие энергетические показатели и быстродействие регулирования.

На примере предложенных автором вариантов ПССКВ впервые вскрыта возможность и обоснована целесообразность симбиоза искусственной коммутации вентилей с методом индуктивно-емкостной параметрической стабилизации тока. Показано, что стабилизирующий эффект при колебаниях параметров нагрузки в ПССКВ может быть обеспечен при сохранении оптимальности в балансе реактивной мощности и существенном повышении эффективности использования конденсаторного и реакторного оборудования. Особенно эффективны ПССКВ с фильтрацией в коммутирующие конденсаторы нечетнократных гармоник токов преобразовательных блоков. Применение комплексов "ПС-ПССКВ-Н" перспективно в различных областях техники, где требуется питание нагрузки стабилизированным постоянным током при изменении ее параметров в широких пределах.

Показана возможность параметрической стабилизации напряжения на нагрузке СКВ за счет соответствующего выбора параметров КУ.

Рассмотрены особенности дискретного трансформаторного регулирования выходных напряжения и тока. Вскрыты пути поддержания высоких энергетических показателей комплексов при таком управлении.

В шестой главе исследуется динамика комплексов "ПС-СКВ-Н", "ПС-НКВ-Н" и "ПС-ПССКВ-Н" в эксплуатационных и аварийных режимах на цифровых моделях. В основу разработанных цифровых моделей положены допущения пятого уровня абстракции, полностью снимающие ограничения на параметры полученных в первой главе компонентных уравнений МК. Отмечена особенность описания комплекса "ПС-ПССКВ-Н". Описаны принципы автоматизированного формирования полных систем уравнений комплексов (I).

В цифровых моделях матрица $T_{к\gamma}$ представляется в виде:

$$T_{к\gamma} = R_{к\gamma} + \rho S_{к\gamma},$$

в котором выделены члены содержащие и не содержащие производных. После этого система (I) преобразуется следующим образом:

$$R_{к\gamma} V_{к\gamma} + S_{к\gamma} \rho V_{к\gamma} = F_{к\gamma}. \quad (I5)$$

Далее из (I5) формируются уравнения состояния (УС) для заданного интервала постоянной структуры комплекса. Формирование осуществляется в два этапа. Первый этап, выполняемый один раз, состоит в исключении из уравнений (I5) переменных, не являющихся переменными состояния. Система (I5) преобразуется к виду:

$$R'_{к\gamma} V'_{к\gamma} + S'_{к\gamma} \rho V'_{к\gamma} = F'_{к\gamma}. \quad (I6)$$

Второй этап преобразований уравнений (I6) выполняется для каждой новой комбинации проводящих вентилях. Исключаются не определяющие конкретную структуру комплекса элементы матрицы $T'_{к\gamma}$. После выполнения операции исключения получаем матричное уравнение

$$R^*_{к\gamma} V^*_{к\gamma} + S^*_{к\gamma} \rho V^*_{к\gamma} = F^*_{к\gamma}, \quad (I7)$$

содержащее только переменные состояния. Умножая (I7) на обратную матрицу $S^{*-1}_{к\gamma}$ с использованием алгоритма Гаусса, окончательно УС приводим к виду:

$$\rho V^*_{к\gamma} = -R_1 V^*_{к\gamma} + R_2 E, \quad (I8)$$

где E - вектор, учитывающий изменение F_{ky}^* во времени.

Независимая от времени часть матрицы F_{ky}^* учитывается в R_2 .

Для решения УС (18) в цифровых моделях использован метод Рунге-Кутты четвертого порядка. На печать выводятся мгновенные значения токов и напряжений комплексов в моменты, определяемые шагом печати и сменной состоянием вентилях. В сервисной части моделей предусмотрен расчет необходимых спектров, средних и действующих значений токов и напряжений, а также энергетических характеристик комплексов. Модели позволяют исследовать комплексы как с управляемыми, так и с управляемыми КВ. В управляемых КВ реализована возможность работы с неподвижными импульсами управления, а также со скачкообразным, линейным и гармоническим законами их движения. В диссертации приведено описание алгоритмов и программ исследуемых комплексов на языке ФОРТРАН.

С помощью разработанных моделей впервые осуществлено моделирование сложных статических и эксплуатационных динамических режимов работы реальных комплексов с тяговой и электролизной нагрузками (режимы с повторной проводимостью вентилях в группе В", подключения к питающей сети, с различными законами управления и др.). В комплексе "ПС-ПССКВ-Н" исследованы возможности параметрической стабилизации тока в динамике при скачкообразном изменении активного сопротивления нагрузки, имитирующем появление анодного эффекта в электролизной серии алюминия. Исследованы аварийные режимы в комплексах, связанные с пробоем вентилях в группе В', то же в В", опрокидыванием инверторного режима в группе В', возникновением короткого замыкания на зажимах нагрузки и др.

Цифровое моделирование переходных процессов управления в комплексе с тиристорным СКВ, выполненное применительно к условиям электролиза алюминия, подтвердило целесообразность использования таких преобразователей лишь в тех случаях, когда для поддержания технологического режима плавное фазовое управление осуществляется в узком диапазоне. При этом обеспечивается сохранение достаточно высоких энергетических характеристик при минимуме амплитуды УТ, пульсаций напряжения и тока нагрузки, амплитуд напряжений на конденсаторах и вентилях.

Исследование динамики управления в комплексе с НКВ, выполненное применительно к условиям железнодорожного транспорта, подтвердило возможность быстродействующего и плавного регулирования электрического режима в нагрузке в достаточно широких пределах практически при отсутствии толчков реактивной мощности в питающей сети.

Переходные процессы управления в комплексах с НКВ не сопровождаются повышением амплитуд напряжений на конденсаторах и вентилях. Комплекс с НКВ обладает повышенной устойчивостью при работе группы В' в инверторном режиме, по сравнению с комплексом на базе некомпенсированного выпрямителя.

Моделирование комплекса "ПС-ПССКВ-Н" показало, что и в динамике в нем удачно сочетаются принципы искусственной коммутации вентиля и параметрической стабилизации тока нагрузки. В результате исследований на цифровых и физических моделях установлено, что по жесткости стабилизации тока комплексы с ПССКВ не уступают аналогичным комплексам с некомпенсированными параметрическими источниками тока. Поэтому предложенные и исследованные СКВ с фильтрацией в коммутационных конденсаторах нечетнократных гармоник токов преобразовательных блоков могут быть рекомендованы для эффективного использования в составе комплексов "ПС-ПССКВ-Н".

Аварийные процессы в рассматриваемых комплексах в основном носят благоприятный характер и не требуют установки сложных защит. В качестве примера на рис. 18 иллюстрируется аварийный процесс при металлическом коротком замыкании на выходных зажимах НКВ в комплексе по рис. 3, смоделированный применительно к условиям железнодорожного транспорта. ЭДС сети E_A , напряжения на вентилях U_{A1} и U_{B1} в группах В' и В'', конденсаторной батарее U_C , нагрузке U_D приведены в киловольтах и показаны тонкими линиями. Токи I_A , вентилях I_{A1} и I_{B1} , нагрузки I_D представлены в килоамперах и изображены толстыми линиями. Пунктиром показаны аварийные токи в комплексе с некомпенсированным несимметричным преобразователем. Из временных диаграмм следует, что аварийные токи в комплексе с НКВ не превышают их уровни в комплексе с некомпенсированным выпрямителем. При появлении режима короткого замыкания напряжения на конденсаторах КУ и всех элементах комплекса "ПС-НКВ-Н" ограничиваются.

Седьмая глава посвящена результатам и перспективам промышленного использования предложенных и исследованных автором КВ в системах электроснабжения установок электротехнологии и транспорта.

Изложена инженерная методика расчета КВ с фильтрацией в коммутационных конденсаторах нечетнократных гармоник токов преобразовательных блоков, впервые разработанная по результатам приведенного выше многоуровневого анализа. Она содержит рекомендации по выбору оптимального схемного варианта КВ в зависимости от конкретных условий. После выбора схемного решения расчет преобразователя проводится по предложенному алгоритму с использованием простых соотношений и номограмм.

В работе инженерная методика проиллюстрирована на конкретном расчете двенадцатифазного СКВ с пятой и седьмой гармониками тока в конденсаторах и параллельным включением выпрямительных мостов (рис. I).

По результатам расчета автором разработаны технические условия на выполнение СКВ для питания электролизных серий цинка Челябинского электролитного цинкового завода. Выходные параметры СКВ - I2500 А, 850 В. Впервые в устройстве одноступенчатой искусственной коммутации вентилей агрегата применены конденсаторы серии ЭСВ с водяным охлаждением и повышенной номинальной частотой. Расчет и выбор конденсаторной батареи КУ выполнен по приведенным в инженерной методике критериям. Реальная эффективность использования батареи в шесть раз выше, чем в традиционном способе компенсации.

Впервые в практике на указанном заводе осуществлено внедрение трех указанных выше СКВ. Описаны результаты всесторонних промышленных испытаний и эксплуатации внедренных преобразователей, которые полностью подтвердили положения теоретических исследований, а также достоверность цифровых моделей и инженерной методики расчета.

Высокая эффективность и положительный опыт эксплуатации первых КВ с фильтрацией в коммутирующие конденсаторы нечетнократных гармоник токов блоков открыли им широкую перспективу использования в народном хозяйстве. Приводятся сведения о разработке КУ для различных преобразователей алюминиевой, электродной, химической промышленности и железнодорожного транспорта, в том числе и о серийном их производстве. Сообщается об использовании материалов исследований автора в проектной практике.

Особое внимание обращено на перспективу разработки несимметричных КВ с двумя и тремя видами несимметрии, нулевых и мостовых схем со специальной конструкцией магнитопровода трансформатора с магнитными шунтами и дополнительными стержнями, параметрически стабилизированных КВ. Возможности последнего направления подтверждены результатами физического моделирования. Экспериментальные исследования полностью согласуются с анализом и цифровым моделированием, выполненными в пятой и шестой главах.

В приложении представлены обоснование схемы замещения электролизной ванны гидromеталлургического производства цинка в динамике, алгоритмы расчета характеристик комплексов, тексты цифровых моделей и материалы, подтверждающие внедрение результатов работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При выполнении диссертационной работы получены следующие основные результаты:

1. Разработан общий алгоритм построения обладающих высокими энергетическими показателями симметричных компенсированных выпрямителей с одноступенчатой искусственной коммутацией вентилей, осуществляемой путем фильтрации в коммутирующие конденсаторы КУ нечетных гармоник входных токов образующих СКВ преобразовательных блоков.

2. На основе указанного алгоритма синтезирован новый класс СКВ, который, по сравнению с известными ранее компенсированными преобразователями с повышенной частотой напряжения на конденсаторах, позволяет осуществлять компенсированный режим включением КУ практически в любую точку комплекса "ПС-СКВ-Н", начиная от питающей сети и кончая вентильными устройствами преобразователя. Благодаря этому перед разработчиками преобразовательной техники и проектантами открываются широкие возможности по оптимизации трансформаторного, реакторного, конденсаторного, вентильного оборудования и схем электроснабжения потребителей постоянного тока на базе СКВ в условиях большого многообразия величин параметров электрического режима на входе и выходе выпрямителей.

3. Обоснована перспективность симбиоза используемого в предложенных СКВ принципа искусственной коммутации вентилей с другими решениями, направленными на обеспечение электромагнитной совместимости преобразователей с питающей сетью и нагрузкой. В диссертации это положение доказано на примерах исследования комплексов с несимметричными и параметрически стабилизированными компенсированными выпрямителями.

4. Предложены принципы построения и схемные решения НКВ с тремя имеющими важное практическое значение видами несимметрии: силовой схемы, управления и включения КУ.

5. Разработана теория квазиустановившихся электромагнитных процессов в основных режимах работы комплексов "ПС-НКВ-Н" с учетом имеющих место в области рабочих токов нагрузки реальных коммутаций вентилей в компенсированной и некомпенсированной выпрямительных группах НКВ и их взаимодействия в процессе регулирования напряжения. Получены распространяемые на широкий круг компенсированных и некомпенсированных, симметричных и несимметричных выпрямителей соотношения, определяющие их токи и напряжения, спектры, внешние и энерге-

тические характеристики. Необходимые в практике проектирования комплексов зависимости рассчитаны на ЭВМ. Показано, что использование указанных видов несимметрии позволяет поддерживать высокие энергетические показатели комплексов при достаточно глубоком и плавном изменении напряжения на нагрузке.

6. Разработана обобщенная теория квазиустановившихся электромагнитных процессов в рабочих режимах комплексов "ПС-СКВ-Н" с учетом вскрытых и реально влияющих на характеристики указанных комплексов явлений резкого снижения постоянной составляющей уравнительного тока параллельно включенных преобразовательных блоков при их неизбежной конструктивной асимметрии и резонанса для переменной составляющей УТ. В относительной форме, применимой для всего класса предложенных СКВ, установлены и рассчитаны на ЭВМ все необходимые для практических расчетов характеристики комплексов. Предложен способ уменьшения УТ за счет оптимального выбора параметров КУ. Показано, что наряду с высокими энергетическими показателями в СКВ без применения дополнительных средств обеспечивается жесткое симметрирование токовой нагрузки блоков и возможность снижения переменной составляющей УТ по сравнению с серийными некомпенсированными агрегатами. В результате при переводе в компенсированный режим последние могут быть существенно упрощены за счет исключения нетехнологичного уравнивающего и сглаживающего оборудования.

7. Исследованы способы регулирования и стабилизации электрического режима в нагрузке рассматриваемых комплексов. Установлены характеристики СКВ с симметричным тиристорным (в зонах с опережающим и отстающим углом сдвига фаз) и дроссельным управлением. Показано, что плавное фазовое регулирование выпрямленного напряжения в СКВ целесообразно лишь в узком диапазоне. Предложены способы дроссельного управления, обеспечивающие повышение энергетических показателей и быстродействия регулирования. Для расширения диапазона плавного регулирования напряжения предложено использовать комплексы с НКВ. Показано, что с уменьшением коэффициента несимметрии силовой схемы диапазон плавного регулирования тиристорами некомпенсированной выпрямительной группы снижается, уменьшается эффект интерференции высших гармоник в сетевом токе и выпрямленном напряжении, но одновременно повышается коэффициент сдвига НКВ. Предложены схемные решения ПССКВ, реализующие способы параметрической стабилизации выпрямленного напряжения и тока. Доказано, что эффекты стабилизации при колебаниях параметров нагрузки в комплексах "ПС-ПССКВ-Н" обеспечиваются при сохранении оптимальности в балансе ре-

активной мощности и существенном повышении эффективности использования конденсаторного оборудования. Рассмотрены особенности трансформаторного регулирования напряжения в комплексах с СКВ и НКВ и тока в комплексах с ПССКВ.

8. Разработаны цифровые модели и с их помощью впервые детально исследована динамика комплексов "ПС-СКВ-Н", "ПС-НКВ-Н" и "ПС-ПССКВ-Н", отвечающая эксплуатационным коммутационным процессам, режимам управления и стабилизации, а также различным аварийным ситуациям. Моделирование переходных процессов выполнено для комплексов с реальными параметрами, соответствующими электролизной и тяговой нагрузкам. Проведенный анализ показал, что по динамическим характеристикам в эксплуатационных режимах, режимах управления и стабилизации рассматриваемые комплексы не уступают аналогичным комплексам на основе некомпенсированных выпрямителей. Характер развития аварийных процессов особых требований к защитным устройствам не предъявляет. В качестве специфической может быть рекомендована лишь защита от перенапряжений на конденсаторах КУ при пробое вентиля в СКВ, ПССКВ или компенсированной группе НКВ и отказе последовательно включенного предохранителя. Такая защита легко реализуется на ограничителях напряжения варисторного типа.

9. Для практического использования разработчиками преобразовательной техники, проектантами и эксплуатационниками результатов многоуровневого анализа комплексов с предложенными компенсированными выпрямителями разработана инженерная методика, содержащая рекомендации по выбору оптимального схемного варианта, а также алгоритм расчета параметров оборудования преобразователей и характеристик комплексов с достаточной точностью по простым соотношениям и номограммам. Достоверность инженерной методики подтверждена расчетом и промышленными испытаниями осуществленных комплексов.

10. На базе проведенных исследований разработаны и внедрены в производство двенадцатифазные СКВ с фильтрацией в коммутирующие конденсаторы пятой и седьмой гармоник токов шестифазных блоков. Подготовлено серийное производство КУ для подобных преобразователей, питающих электротехнологические установки различного назначения. Показаны перспективы использования комплексов с СКВ, НКВ и ПССКВ.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Хохлов Ю.И., Баев А.В. Регулирование выпрямленного напряжения компенсированных преобразователей //Повышение эффективности устройств преобразовательной техники: Материалы научно-технической

активной мощности и существенном повышении эффективности использования конденсаторного оборудования. Рассмотрены особенности трансформаторного регулирования напряжения в комплексах с СКВ и НКВ и тока в комплексах с ПССКВ.

8. Разработаны цифровые модели и с их помощью впервые детально исследована динамика комплексов "ПС-СКВ-Н", "ПС-НКВ-Н" и "ПС-ПССКВ-Н", отвечающая эксплуатационным коммутационным процессам, режимам управления и стабилизации, а также различным аварийным ситуациям. Моделирование переходных процессов выполнено для комплексов с реальными параметрами, соответствующими электролизной и тяговой нагрузкам. Проведенный анализ показал, что по динамическим характеристикам в эксплуатационных режимах, режимах управления и стабилизации рассматриваемые комплексы не уступают аналогичным комплексам на основе некомпенсированных выпрямителей. Характер развития аварийных процессов особых требований к защитным устройствам не предъявляет. В качестве специфической может быть рекомендована лишь защита от перенапряжений на конденсаторах КУ при пробое вентиля в СКВ, ПССКВ или компенсированной группе НКВ и отказе последовательно включенного предохранителя. Такая защита легко реализуется на ограничителях напряжения варисторного типа.

9. Для практического использования разработчиками преобразовательной техники, проектантами и эксплуатационниками результатов многоуровневого анализа комплексов с предложенными компенсированными выпрямителями разработана инженерная методика, содержащая рекомендации по выбору оптимального схемного варианта, а также алгоритм расчета параметров оборудования преобразователей и характеристик комплексов с достаточной точностью по простым соотношениям и номограммам. Достоверность инженерной методики подтверждена расчетом и промышленными испытаниями осуществленных комплексов.

10. На базе проведенных исследований разработаны и внедрены в производство двенадцатифазные СКВ с фильтрацией в коммутирующие конденсаторы пятой и седьмой гармоник токов шестифазных блоков. Подготовлено серийное производство КУ для подобных преобразователей, питающих электротехнологические установки различного назначения. Показаны перспективы использования комплексов с СКВ, НКВ и ПССКВ.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Хохлов Ю.И., Баев А.В. Регулирование выпрямленного напряжения компенсированных преобразователей //Повышение эффективности устройств преобразовательной техники: Материалы научно-технической

конференции.- Киев: Наукова думка, 1972.- Ч. 2.- С. 48-51.

2. Хохлов Ю.И., Баев А.В. Вентильный преобразователь с повышенным коэффициентом мощности при глубоком регулировании выпрямленного напряжения //В кн.: Автоматизация энергосистем и энергоустановка промышленных предприятий.- Челябинск: ЧПИ, 1973.- № 122.- С.35-41.

3. Хохлов Ю.И., Баев А.В. К электромагнитным процессам в несимметричном компенсированном преобразователе //В кн.: Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентильных преобразователей.- Челябинск: ЧПИ, 1973.- № 135.- С. 71-78.

4. Хохлов Ю.И., Баев А.В. Несимметричные компенсированные выпрямители //Электромеханика, 1974.- № 4.- С. 437-443.

5. Хохлов Ю.И., Баев А.В. Режимы работы компенсированных полупроводниковых выпрямителей с комбинированным способом регулирования напряжения //Промышленная энергетика, 1974.- № 8.- С. 16-20.

6. Хохлов Ю.И., Баев А.В. Целесообразные области использования компенсированных симметричных и несимметричных управляемых выпрямителей //Электромеханика, 1977.- № 6.- С. 653-659.

7. Результаты промышленных испытаний систем некомпенсированный реверсивный преобразователь - электролизная серия /Ю.И.Хохлов, И.Л. Красногорцев, Л.В.Мендикова и др. //Промышленная энергетика, 1981.- № 4.- С. 25-29.

8. Кукушкин С.Н., Торбенков Г.М., Хохлов Ю.И. Идентификация электролизной ванны как динамического объекта //Проблемы нелинейной электротехники: Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции.- Киев: Наукова думка, 1981.- Ч. 3.- С. 73-76.

9. Хохлов Ю.И. О путях снижения вредного влияния мощных преобразовательных систем на питающую сеть //Промышленная энергетика, 1982.- № 4.- С. 29-33.

10. А.с. 922970 (СССР). Двадцатичетырехфазный преобразовательный агрегат /Ю.И.Хохлов, И.Л.Красногорцев, Я.Л.Фишлер и др.//Бюл. изобр.- 1982.- № 15.

11. А.с. 1019568 (СССР). 2 m -фазная преобразовательная система электропитания /Ю.И.Хохлов //Бюл.изобр.- 1983.- № 19.

12. А.с. 1056396 (СССР). 12 к-фазная компенсированная система электропитания /Ю.И.Хохлов //Бюл.изобр.- 1983.- № 43.

13. А.с. 1116507 (СССР). Компенсированный преобразователь переменного напряжения в постоянное /Ю.И.Хохлов, В.П.Гуляев, Н.И.Пысин и др. //Бюл.изобр.- 1984.- № 36.

14. А.с. 1117801 (СССР). 12 к-фазный компенсированный преобра-

зователь переменного напряжения в постоянное /Ю.И.Хохлов, Я.Л.Фишлер, Л.М.Пестряева и др. //Бюл.изобр.- 1984.- № 37.

15. А.с. 1119144 (СССР). Компенсированный преобразователь переменного напряжения в постоянное /Ю.И.Хохлов, Я.Л.Фишлер, Л.М.Пестрякова и др. //Бюл.изобр.- 1984.- № 38.

16. А.с. 1124414 (СССР). Компенсированный преобразователь переменного напряжения в постоянное /Ю.И.Хохлов //Бюл.изобр.- 1984.- № 42.

17. А.с. 1164843 (СССР). Несимметричный компенсированный преобразователь переменного напряжения в постоянное /Ю.И.Хохлов //Бюл.изобр.- 1985.- № 24.

18. А.с. 1179504 (СССР). Преобразователь переменного напряжения в постоянное и обратно /Ю.И.Хохлов, И.Л.Красногорцев, В.И.Швец и др. //Бюл.изобр.- 1985.- № 34.

19. Хохлов Ю.И. Схемные варианты двенадцатифазных компенсированных преобразовательных систем с пятой и седьмой гармониками тока в конденсаторах //Промышленная энергетика, 1985.- № 4.- С. 29-33.

20. Хохлов Ю.И., Красногорцев И.Л. Схемы и характеристики компенсированных многофазных преобразовательных систем с конденсаторами, работающими при повышенной частоте //Электричество, 1985.- № 4.- С.38-42.

21. Преобразовательные агрегаты промышленных предприятий с повышенным коэффициентом мощности /Я.Л.Фишлер, В.П.Светоносков, Л.М.Пестряева, Ю.И.Хохлов и др. //Проблемы электромагнитной совместимости силовых полупроводниковых преобразователей: Тезисы докладов Третьего Всесоюзного научно-технического совещания.- Таллин: АН ЭССР, 1986.- Ч. I.- С. 77 - 78.

22. Хохлов Ю.И., Красногорцев И.Л. Применение ЭВМ при исследовании установившихся и переходных режимов работы компенсированных преобразователей с 5-й и 7-й гармониками тока в конденсаторах//Применение вычислительной техники для исследования и автоматизации проектирования преобразователей: Тезисы докладов Всесоюзного научно-технического совещания.- М.: Информэлектро, 1987.- С. 47-49.

23. Хохлов Ю.И., Хусаинов Ш.Н. Численный метод исследования электромагнитных процессов в сложных нелинейных цепях с вентилями //Тезисы докладов I Всесоюзной конференции по теоретической электротехнике.- Ташкент: ТашПИ, 1987.- С. 164-165.

24. А.с. 1339534 (СССР). Устройство для питания электротехнологических установок /К.Д.Гуттерман, Ю.И.Хохлов, В.В.Володин и др. //Бюл.изобр.- 1987.- № 35.

25. Электромагнитные процессы и характеристики системы "параметрический источник тока - симметричный компенсированный преобразователь" /Ю.И.Хохлов, С.Г.Ляпкало, К.Д.Гуттерман и др. //Улучшение электромагнитной совместимости электрических полупроводниковых преобразователей как средство экономии материальных и энергетических ресурсов: Тезисы докладов Второго Всесоюзного совещания.- М.: Информэлектро, 1987.- С. 30-31.

26. Хохлов Ю.И. Характеристики несимметричных компенсированных преобразователей с пятой и седьмой гармониками тока в конденсаторах //Пути экономии и повышения эффективности использования электроэнергии в системах электроснабжения промышленности и транспорта: Тезисы докладов II Всесоюзной научной конференции.- М.: МЭИ, 1987.- С. 117.

27. Хохлов Ю.И. Системы электропитания установок электротехнологии и транспорта на базе компенсированных преобразователей с пятой и седьмой гармониками тока в конденсаторах //Улучшение электромагнитной совместимости электрических полупроводниковых преобразователей как средство экономии материальных и энергетических ресурсов: Тезисы докладов Второго Всесоюзного совещания.- М.: Информэлектро, 1987.- С. 28-29.

28. Хохлов Ю.И., Хусаинов Ш.Н. Динамические электромагнитные процессы в комплексе "питающая сеть - компенсированный преобразователь - нагрузка" //Проблемы преобразовательной техники: Тезисы докладов IV Всесоюзной научно-технической конференции.- Киев: ИЭД АН УССР, 1987.- Ч. 2.- С. 235-237.

29. Красногорцев И.Л., Хохлов Ю.И. Уравнительные свойства компенсированных преобразователей с пятой и седьмой гармониками тока в конденсаторах //Проблемы преобразовательной техники: Тезисы докладов IV Всесоюзной научно-технической конференции.- Киев: ИЭД АН УССР, 1987.- Ч. 1.- С. 125-127.

30. А.с. 1372546 (СССР). Способ уменьшения уравнительного тока двенадцатифазного компенсированного выпрямителя с пятой и седьмой гармониками тока в коммутирующих конденсаторах /Ю.И.Хохлов, И.Л. Красногорцев, С.Г.Ляпкало и др. //Бюл.изобр.- 1988.- № 5.

31. А.с. 1379912 (СССР). 12 к-фазная компенсированная система электропитания /Ю.И.Хохлов //Бюл.изобр.- 1988.- № 9.

32. А.с. 1403295 (СССР). 12 к-фазная компенсированная система электропитания /Ю.И.Хохлов, С.В.Захаревич, Я.Л.Фишлер и др. //Бюл. изобр.- 1988.- № 22.

33. А.с. 1403297 (СССР). Компенсированный преобразователь /Ю.И.Хохлов, К.Д.Гуттерман, Я.Л.Фишлер и др. //Бюл.изобр.- 1988.- № 22.

34. Хохлов Ю.И., Красногорцев И.Л. Электромагнитные процессы в компенсированном преобразователе с резонансными явлениями в контуре уравнивающего тока //Электричество, 1988.- № 4.- С. 34-41.

35. Хохлов Ю.И. Высокоэффективный компенсированный выпрямительный агрегат //Информационный листок о научно-техническом достижении № 88-10.- Челябинск: ЦНТИ, 1988.- 3 с.

36. Хохлов Ю.И., Хусаинов Ш.Н. Анализ сложных многофазных вентильных цепей контурно-узловым методом //Электричество, 1989.- № 2.- С. 43-51.

37. Результаты промышленных испытаний первого компенсированного выпрямительного агрегата с пятой и седьмой гармониками тока в конденсаторах /Ю.И.Хохлов, И.Л.Красногорцев, С.Г.Ляпкало и др. //Электричество, 1989.- № 3.- С. 26-31.

38. Хохлов Ю.И. Компенсированные преобразовательные системы электропитания с нечетнократной составляющей спектра тока блоков в коммутирующих конденсаторах в статике и динамике //Силовая полупроводниковая техника и ее применение в народном хозяйстве: Тезисы докладов УШ Всесоюзной научно-технической конференции. - Челябинск: ЧПИ, 1989.- С. 153-154.

39. Хохлов Ю.И. Компенсированные многофазные преобразователи //Электротехника, 1989.- № 7.- С. 12-17.

40. Хохлов Ю.И., Розкин В.О. Квазиустановившиеся электромагнитные процессы и характеристики двадцатичетырехфазного компенсированного преобразователя //Электричество, 1990.- № 10.- С. 48-54.

Принципиальная схема КВБ с включением КУ на стороне вентиляльных обмоток преобразовательного трансформатора

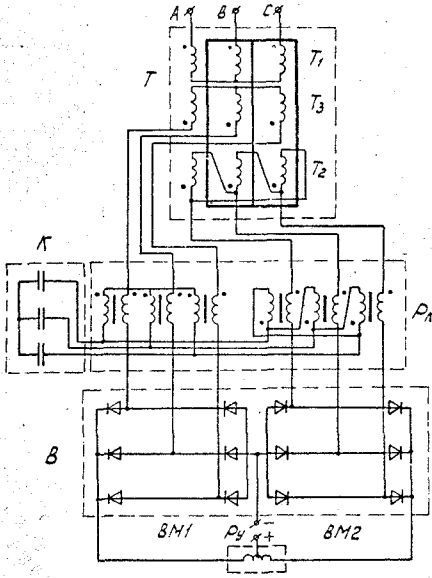


Рис. 1

Вариант исполнения КУ

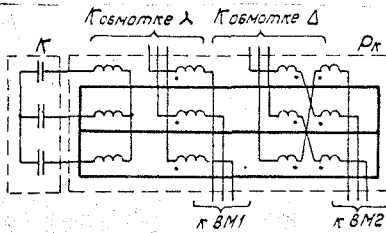


Рис. 2

Схема комплекса "ПС-НКВ-Н" с последовательным соединением мостов в выпрямительных группах

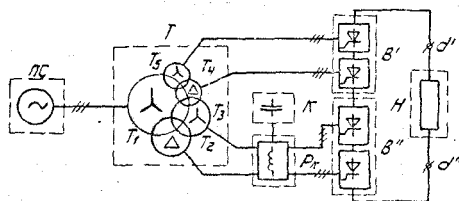


Рис. 3

Схема комплекса "ПС-НКВ-Н" с параллельным соединением мостов в выпрямительных группах

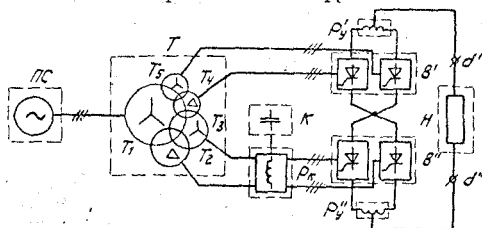


Рис. 4

Схема замещения для описания коммутационных процессов в НКВ

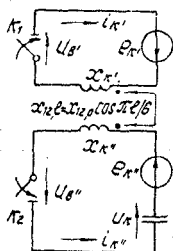


Рис. 5

Области режимов работы комплексов с НКВ

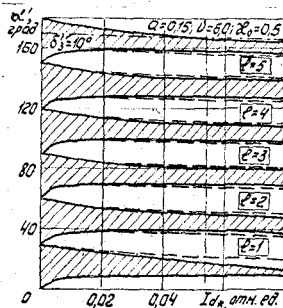


Рис. 6

Внешние характеристики НКВ Коэффициент сдвига НКВ

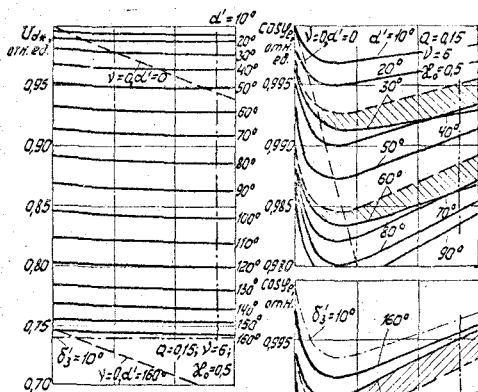


Рис 7
Угол задержки включения
вентилей в группе В'

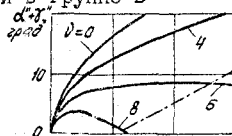


Рис. 8

Влияние коэффициента связи λ
на внешние характеристики НКВ

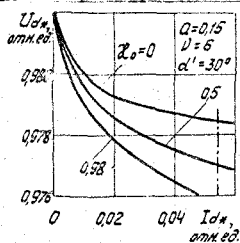


Рис. 9

Гармоники сетевого тока НКВ

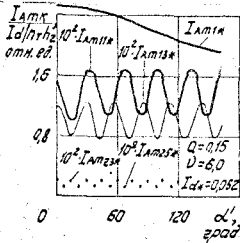


Рис. 10

Рис. 11

Небаланс постоянных составляющих токов блоков СКВ

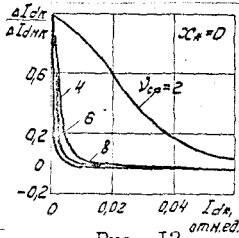


Рис. 12

Зависимость амплитуды УТ в СКВ от сопротивления X_{3*}

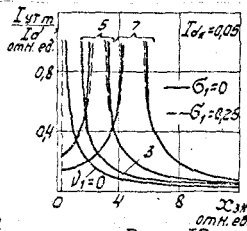


Рис. 13

Внешние характеристики СКВ без уравнительного тока

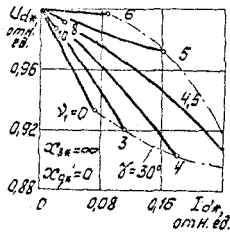


Рис. 14

Зависимости $tg\varphi_e$ от I_{d*} в СКВ без уравнительного тока

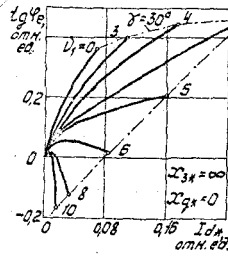


Рис. 15

Внешние характеристики СКВ с уравнительным током

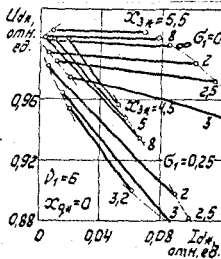


Рис. 16

Зависимости $tg\varphi_e$ от I_{d*} в СКВ с уравнительным током

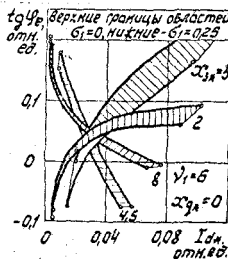


Рис. 17

Переходный процесс в комплексе с НКВ при коротком замыкании
цепи нагрузки

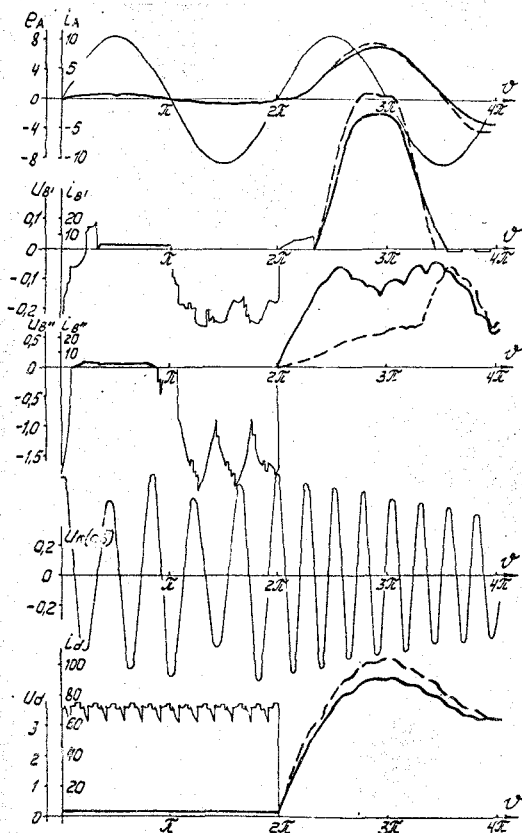


Рис. 18

Подписано к печати
Печ. л. 2,5

Л. 5/11-91.
Тираж 100

Заказ 188

Бесплатно.

Типография МЭИ, Красноказарменная, 13.