

05,09.12

Д.438

На правах рукописи



Дзюба Михаил Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ
ПРОЦЕССОВ В КОМПЕНСИРОВАННОМ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ ЧАСТОТЫ**

Специальность 05.09.12 – «Силовая электроника»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск

2004

Работа выполнена на кафедре «Системы электроснабжения»
Южно-Уральского государственного университета.

Научный руководитель – доктор технических наук,
профессор Хохлов Ю.И.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Шипицын В.В.;

кандидат технических наук,
профессор Гельман М.В.

Ведущее предприятие – компания «Энергомаш (ЮК) Лимитед»,
департамент ЭТО,
инженерный центр (г. Екатеринбург).

Защита состоится 23 декабря 2004 г., в 14-00 часов, в ауд.1001
на заседании диссертационного совета Д 212.298.05 при Южно-Уральском
государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск,
пр. им. В.И. Ленина, 76, ЮУрГУ. Факс: (3512) 67-90-83.
E-mail: dma@74.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан 22 ноября 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



Ю.С.УСЫНИН

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

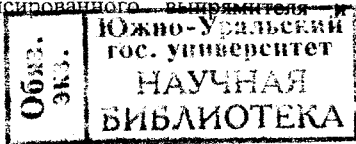
Актуальность проблемы. Одной из важнейших в политике энергосбережения является проблема снижения потерь и повышения качества электрической энергии в электрических сетях энергоемких производств. Современные тенденции развития технологий требуют использования систем электроснабжения на основе силовой преобразовательной техники (СПТ). Большой шаг, сделанный в последние годы в области создания новых классов электронных приборов, таких структур как GTO, IGCT тиристоры и IGBT транзисторы, определяет направление совершенствования СПТ. Создаются системы электроснабжения с мощными выпрямителями на основе указанных приборов. Улучшаются уже известные способы повышения электромагнитной совместимости СПТ с питающей сетью (ПС) за счет новых схемных решений, алгоритмов и способов управления на базе современных силовых вентилях. Однако наряду с хорошей управляемостью процессами такие системы пока еще имеют ряд недостатков, связанных со сложностью как схемных решений, проектированием, наладкой и эксплуатацией, так и с достаточно высокими экономическими затратами.

Поэтому по-прежнему остается актуальной задача создания простых как в исполнении, так и в эксплуатации, но вместе с тем и эффективных устройств СПТ, использующих принципы полезного применения естественных физических свойств индуктивно-емкостных схем. Это позволяет проектировать надежные, не требующие больших затрат системы электроснабжения на основе СПТ, удовлетворяющие всем современным требованиям по энергосбережению.

Уже существует ряд хорошо проработанных в этом направлении теорий компенсированных выпрямителей. Однако область возможного использования этого класса выпрямителей может быть шире, если учесть, что в качестве нагрузки может выступать не только элемент с неизменной топологией в виде двигателя постоянного тока, электролизной серии и других подобных им, но и автономный инвертор, составляющий в купе с выпрямителем преобразователь частоты (ПЧ) со звеном постоянного тока.

Все чаще для электротехнологий требуются источники питания с регулируемой частотой на основе эффективных, энергосберегающих преобразователей. В связи с этим актуальной задачей развития современной преобразовательной техники является проведение дополнительных исследований по работе компенсированных выпрямителей на нагрузку с изменяемой топологией.

Цель работы. Целью диссертационной работы является исследование нового типа ПЧ со звеном постоянного тока, построенного на основе совместной работы компенсированного выпрямителя и автономного инвертора тока (АИТ).



Идея работы заключается в использовании компенсированных выпрямителей в составе ПЧ со звеном постоянного тока.

Методы исследования. В основу анализа статических характеристик комплекса на математической модели положен метод основной гармоники. Для анализа электромагнитных процессов в компенсированном преобразователе частоты (КПЧ) на цифровой модели при формировании полной системы уравнений применялись элементы теории графов и смешанный контурно-узловой (СКУ) метод. Численное решение полной системы уравнений на ЭВМ проводилось с помощью метода Рунге-Кутты. При оценке спектрального состава напряжений и токов использован метод гармонического анализа. Так же были применены элементы дифференциального и интегрального исчисления.

Научные положения и результаты, выносимые на защиту:

— возможность совместной работы компенсированного выпрямителя с АИТ;

— для снижения уровня потребления реактивной мощности ПЧ со звеном постоянного тока целесообразно использовать схемы на основе компенсированных выпрямителей;

— установленное оборудование ПЧ с двенадцатифазными компенсированными выпрямителями с фильтрацией в коммутирующие конденсаторы нечетнократных (пятой, седьмой) гармоник токов преобразовательных блоков используется эффективнее, чем при традиционных способах компенсации реактивной мощности;

— результаты теоретических и экспериментальных исследований электромагнитных процессов в КПЧ.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается корректным использованием метода основной гармоники при общепринятых допущениях в математической модели, смешанного контурно-узлового метода и метода Рунге-Кутты при цифровом моделировании, а так же удовлетворительным совпадением результатов теоретических исследований с экспериментальными данными.

Научное значение работы:

— впервые получено аналитическое выражение связи основных параметров компенсированного выпрямителя и АИТ;

— впервые разработана цифровая модель КПЧ с учетом конечного значения индуктивного сопротивления сглаживающего реактора, активных сопротивлений, токов намагничивания трансформатора и реакторов;

— результаты анализа электромагнитных процессов в КПЧ позволили сформулировать критерии выбора элементов силовой части предложенной схемы.

Практическое значение работы:

— предложена новая энергоэффективная схема ПЧ со звеном постоянного тока;

— разработана инженерная методика расчета, позволяющая рассчитать параметры основных элементов, предложенной схемы КПЧ;

— разработана и реализована физическая модель КПЧ, с помощью которой подтверждены теоретические выводы.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы приняты к использованию ОАО «Южноуральский арматурно-изоляционный завод» при реконструкции установки плавки металла на основе тиристорного преобразователя частоты.

Оформленные в виде отдельных разделов и математических моделей результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс ЮУрГУ в курсах «Основы энергосберегающей энергетической электроники», «Системы электроснабжения на основе устройств силовой преобразовательной техники».

Апробация работы. Основные теоретические положения, результаты и выводы диссертационной работы докладывались и обсуждались на ежегодных научно-практических конференциях ЮУрГУ, на Международной научно-технической конференции «Уральская металлургия на рубеже тысячелетий» (ЮУрГУ, г. Челябинск, 1999), научно-практической конференции «Энергосбережение в промышленности и в городском хозяйстве» (ЮУрГУ, г. Челябинск, 2000), Межотраслевой научно-технической конференции «Дни науки ОТИ МИФИ» (г. Озерск, 2002), Научно-технической конференции «Электроснабжение, электрооборудование, энергосбережение» (г. Новомосковск, 2002).

Публикации. По результатам работы опубликовано 7 печатных трудов.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Содержит 80 стр. основного текста, 47 иллюстраций, 9 стр. списка литературы из 75 наименований, 3 приложения. Общий объем работы составляет 157 стр.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы ее цели, дана аннотация полученных результатов и положений, выносимых на защиту.

В первой главе проведен обзор существующих схемных решений отдельных блоков ПЧ со звеном постоянного тока — выпрямителей и АИТ.

Рассмотрены известные способы повышения энергоэффективности и электромагнитной совместимости выпрямителей с ПС. Это повышение фазности, установка внешних специальных устройств, включение нескольких преобразовательных агрегатов различной конструкции на параллельную работу, использование специальных методов управления выпрямителями (поочередное, несимметричное), выделение на отдельные

сборные шины преобразовательных подстанций, увеличение мощности короткого замыкания ПС. Одним из наиболее перспективных способов решения проблемы электромагнитной совместимости выпрямителей с ПС является совершенствование схем самих преобразователей, а так же способов управления ими. В результате анализа преимуществ и недостатков рассмотренных схем выпрямителей предпочтение отдано компенсированным выпрямителям с фильтрацией в коммутационные конденсаторы нечетнократных гармоник токов преобразовательных блоков. Класс этих преобразователей наряду с хорошей электромагнитной совместимостью, как с нагрузкой, так и с ПС (что характерно и для некоторых других вариантов), обладает неоспоримыми преимуществами в конструктивной простоте, в массогабаритных и экономических показателях.

Далее дан обзор известных и широко устремимых в схемах мощных ПЧ вариантов АИТ. Как правило, в промышленности используются мостовые схемы инверторов с общим узлом коммутации тиристоров. Анализируя свойства описанных АИТ и принимая во внимание задачи, поставленные в данной работе, для дальнейшего изучения выбран параллельный АИТ. Это позволило исследовать влияние на выпрямитель нагрузки с изменяемой топологией и сделать выводы о преимуществах и недостатках использования компенсированного выпрямителя в составе ПЧ.

Электромагнитные процессы в выпрямителях и АИТ достаточно хорошо и подробно изучены как отечественными, так и зарубежными исследователями. Работ, учитывающих взаимовлияние блоков ПЧ друг на друга, значительно меньше. Проведенный обзор этих трудов показал, что в основном решаются узконаправленные задачи:

- влияние величины индуктивности сглаживающего реактора (L_d) на гармонический состав выпрямленного напряжения и последствия его ухудшения на устойчивость работы, особенно при прерывистом входном токе инвертора;
- возможные переходные режимы при различных видах наложения коммутаций вентиля инвертора на коммутации вентиля выпрямителя;
- гармонический состав тока сети при различных частотах выходного напряжения АИТ и т.д.

В результате проведенного обзора литературы сделан вывод о необходимости подробных исследований свойств ПЧ с энергоэффективными выпрямителями как единого комплекса с учетом влияния АИТ.

Вторая глава посвящена исследованию статических характеристик КПЧ. Схема, приведенная на рисунке 1, имеет сложную, нелинейную структуру с изменяющейся топологией. Поэтому для приближенной оценки статических характеристик комплекса принят ряд допущений, упрощающих анализ:

- ЭДС питающей сети e_s синусоидальна;

- токи холостого хода трансформатора и реактора не учитываются;
- выпрямленный ток идеально сглажен ($x_d = \infty$);
- активные сопротивления во всех ветвях схемы равны нулю;
- инвертированный ток учитывается только первой гармоникой.

Внешняя характеристика выпрямителя в относительных единицах описывается уравнениями:

$$U_{d*} = k_u \cos\left(\alpha + \frac{\gamma}{2}\right) \cos\left(\frac{\gamma}{2}\right);$$

$$I_{d*} = k_i \sin\left(\alpha + \frac{\gamma}{2}\right) \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right),$$

где α — угол включения вентилей; γ — угол коммутации вентилей; k_u, k_i — коэффициенты, учитывающие степень компенсации выпрямителя.

Формулы, определяющие коэффициенты в выражениях внешней характеристики выпрямителя, имеют вид:

$$k_i = \frac{1}{1 - v^2} \frac{\frac{\gamma}{2} \operatorname{ctg}\left(v \frac{\gamma}{2}\right) - \frac{\gamma}{2}}{\frac{1}{\gamma} \operatorname{ctg}\left(v \frac{\gamma}{2}\right) - \frac{\gamma}{2} - \psi};$$

$$k_u = 1 + \left(\psi - \frac{\gamma}{2}\right) k_x;$$

$$k_x = \frac{v^2}{1 - v^2} \left(\operatorname{tg}\left(\frac{\gamma}{2}\right) - \frac{1}{v} \operatorname{tg}\left(v \frac{\gamma}{2}\right) \right),$$

где ψ — схемный параметр, определяющийся длительностью нарастания коммутирующего напряжения от нуля до максимума при мгновенной коммутации; v — относительная величина собственной частоты контура коммутации выпрямителя. Для схемы на рисунке 1

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

В то же время известно, что входная характеристика АИТ в относительных единицах может быть выражена так:

$$I_{d*} = \frac{U_{d*} a^2}{x_c} B \cos \varphi_H \left(1 + \left(\frac{1 - B \sin \varphi_H}{B \cos \varphi_H} \right)^2 \right),$$

где $a = \frac{\pi}{2\sqrt{2}}$ - коэффициент схемы АИТ на рисунке 1; $V = \frac{x_c}{z_n}$ - коэффициент нагрузки АИТ; φ_n - угол сдвига фаз между первыми гармониками напряжения и тока в нагрузке; x_c - относительное сопротивление коммутирующего конденсатора АИТ.

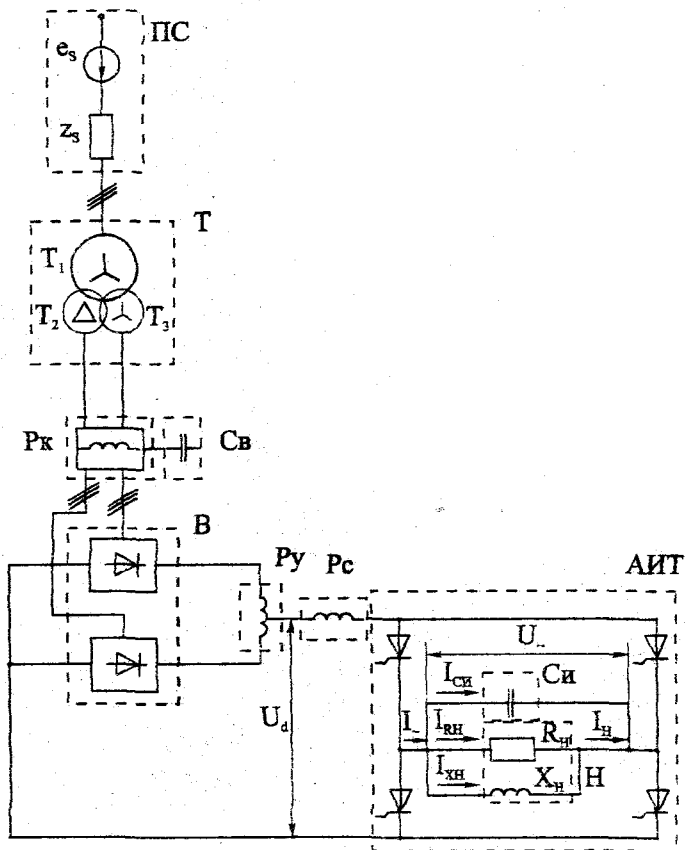


Рис. 1. Компенсированный преобразователь частоты со звеном постоянного тока

Проведенное совместное решение уравнений внешней характеристики выпрямителя и входной характеристики АИТ, дает зависимость коэффициента нагрузки АИТ от остальных параметров схемы ПЧ:

$$B = \frac{1}{2} \left(2 \sin \varphi_H + \frac{k_1 x_c}{k_U a^2} \operatorname{tg} \left(\alpha + \frac{\gamma}{2} \right) \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\gamma}{2} \right) \cos \varphi_H \right) \pm$$

$$\pm \sqrt{2 \sin(2\varphi_H) \frac{k_1 x_c}{k_U a^2} \operatorname{tg} \left(\alpha + \frac{\gamma}{2} \right) \operatorname{tg} \left(\frac{\gamma}{2} \right) + \frac{1}{2} \left(\left(\frac{k_1 x_c}{k_U a^2} \operatorname{tg} \left(\alpha + \frac{\gamma}{2} \right) \operatorname{tg} \left(\frac{\gamma}{2} \right) \right)^2 - 4 \right) (1 + \cos(2\varphi_H))}$$

В среде MatchCad реализована программа, использующая установленную связь параметров выпрямителя и АИТ и позволяющая рассчитать статические характеристики КПЧ. Исследования, проведенные с помощью указанной программы, показали, что согласно теории компенсированных выпрямителей в зависимости от величины ν жесткость внешней характеристики выпрямителя изменяется. В свою очередь, входные и внешние характеристики АИТ, подключенного к такому выпрямителю, так же видоизменяются, поскольку зависят от величины выпрямленного напряжения. Повышение жесткости внешних характеристик выпрямителя приводит к смещению в область больших значений входного тока и напряжения на нагрузке АИТ. Более мягкая характеристика выпрямителя снижает величину потребляемого АИТ тока и, соответственно, напряжение на нагрузке. Чем мягче характеристика выпрямителя и больше удаление параметра B от единицы, тем значительнее указанное изменение. Это объясняется тем, что при одном и том же сопротивлении нагрузки и остальных параметрах схемы напряжение на нагрузке изменяется пропорционально выпрямленному напряжению, а это ведет к соответствующему изменению тока, протекающего через нагрузку, что, в свою очередь, оказывает влияние на ток, потребляемый от выпрямителя. Используя это свойство, можно управлять мощностью, передаваемой в нагрузку, регулируя жесткость внешней характеристики выпрямителя. Одновременно с этим, учитывая принятые выше допущения, энергетические характеристики такого ПЧ в точке подключения к ПС в зависимости от величины ν определяются только свойствами выпрямителя и при $\nu \approx 6$ в неуправляемом выпрямителе наблюдается режим полной компенсации реактивной мощности. Введение углов управления выпрямителем при симметричном управлении приводит к значительному ухудшению электромагнитной совместимости КПЧ с ПС.

Показано, что номинальный режим работы АИТ находится в узком диапазоне значений коэффициента нагрузки B , равном $0,9 - 1$, а напряжение на нагрузке не должно быть больше $1,5 U_d$. Что касается выпрямителя, то номинальный режим его работы находится в пределах относительных значений выпрямленного тока $0,03 - 0,07$. По результатам измерений, полученных на Южноуральском арматурно-изоляционном заводе на агрегате ТПЧП-1000, известно, что сопротивление нагрузки в течение одного цикла работы изменяется примерно в полтора раза. Кроме того, в процессе работы в $2-3$ раза изменяется и $\operatorname{tg} \varphi_H$. Так же, технологическим процессом определяется диапазон частот тока нагрузки.

Для установок большой мощности номинальные значения частот равны 250–500 Гц. Поэтому, чтобы обеспечить все требования технологического процесса, надо выбрать величину емкости коммутирующего конденсатора инвертора и задать закон изменения частоты инвертирования такими, чтобы обеспечить устойчивую работу АИТ и возможный диапазон тока, потребляемого от выпрямителя. Методика расчета, приведенная в четвертой главе, показывает, что можно выбрать такую величину емкости коммутирующего конденсатора инвертора, при которой АИТ работает в номинальном устойчивом режиме, и диапазон потребляемых им токов соответствует нормальному режиму работы выпрямителя.

По программе, указанной выше, рассчитаны режимы и характеристики КПЧ для двух значений $\operatorname{tg}\varphi_n$ и частоты инвертирования – f_n . На рисунке 2 показаны внешние характеристики выпрямителя при различных значениях v . На рисунке 3 показаны характеристики КПЧ при $v=6$, $\operatorname{tg}\varphi_n=4$, $f_n=250$ Гц. По рисункам видно, что как АИТ, так и выпрямитель находятся в нормальном режиме работы. Аналогично, на рисунке 4 представлены характеристики КПЧ при $v=6$, $\operatorname{tg}\varphi_n=12$ и $f_n=500$ Гц. Точки А и В, указанные на рисунках, при принятых одинаковых других параметрах схемы соответствуют значениям полных сопротивлений нагрузки 0,3 и 0,15 Ом, что говорит о возможном двукратном изменении. Это позволяет полностью обеспечить все требования технологического процесса.

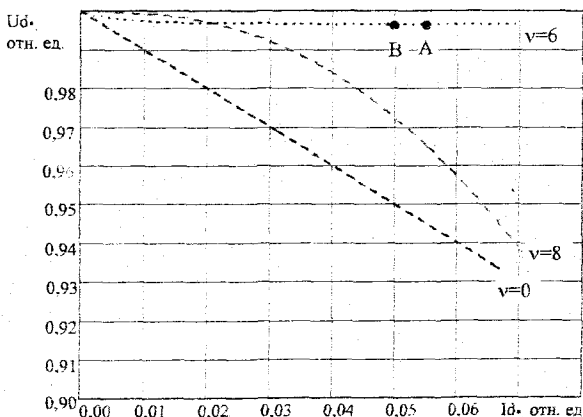


Рис. 2. Внешние характеристики компенсированного выпрямителя с различной степенью компенсации

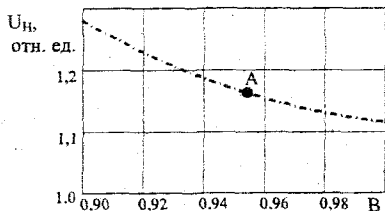
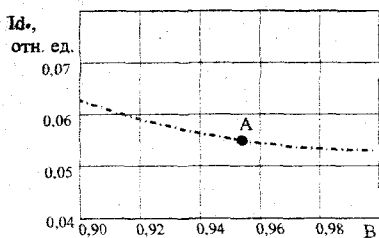


Рис. 3. Входная и внешняя характеристики АИТ при $v=6$, $\operatorname{tg}\varphi_n=4$, $f_n=250$ Гц

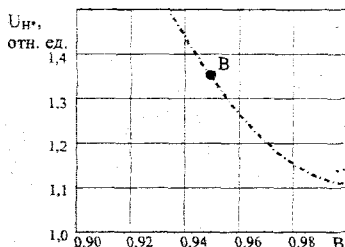
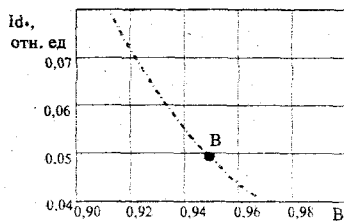


Рис. 4. Входная и внешняя характеристики АИТ при $v=6$, $\operatorname{tg}\varphi_n=12$, $f_n=500$ Гц

В третьей главе исследуются установившиеся и переходные процессы в КИЧ. Снимаются допущения, принятые во второй главе, и комплекс «ПС – компенсированный выпрямитель – сглаживающий реактор – АИТ – нагрузка» представляется цепью с многополюсными компонентами (МК). Составляются компонентные уравнения каждой МК. Электрическая схема комплекса представлена в виде графа (рисунок 5), каждой МК которого соответствует многомерное ребро, а выбранным напряжениям и токам, характеризующим состояние МК, подребра одномерного представления. Компоненты электрической цепи комплекса характеризуются различными параметрами, поэтому для получения полной системы уравнений, легко сводящейся к уравнениям состояния, используется СКУ метод. Граф содержит подребра только типа Y и Z.

В графе комплекса закорачиваются все подребра типа Y. Выбирается произвольное дерево в оставшемся Z-подграфе. Векторы токов и напряжений подребер дерева обозначаются I_1 и U_1 , а векторы связей – I_2 и U_2 . Затем в графе комплекса размыкаются все подребра типа Z. В оставшемся подграфе вновь выбирается произвольное дерево. Векторы токов и напряжений этого дерева обозначаются I_3 и U_3 , а векторы связей – I_4 и U_4 . При таком разбиении токов и напряжений на группы 1, 2, 3 и 4 уравнения Кирхгофа для сечений и контуров графа комплекса принимают вид:

$$\begin{bmatrix} 1 & Q_{12} & 0 & 0 \\ 0 & Q_{32} & 1 & Q_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = 0; \quad \begin{bmatrix} B_{21} & 1 & B_{23} & 0 \\ 0 & 0 & B_{43} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = 0,$$

где первый индекс в подматрицах сечений Q и контурах B соответствует номеру определяющей главные сечения и контуры группы, а второй – номеру группы, с которой записана матрица инцидентности.

Путем ряда преобразований получается матричное уравнение комплекса:

$$T_{KV} V_{KV} = F_{KV},$$

где T_{KV} , V_{KV} и F_{KV} – соответственно, матрица параметров, первичных переменных и источников.

На языке Fortran разработана цифровая модель исследуемого комплекса, использующая СКУ метод для формирования уравнений состояния, а для дальнейшего численного расчета метод Рунге-Кутты и элементы интегрального исчисления и спектрального анализа.

Исследования, проведенные с помощью указанной цифровой модели, подтвердили выводы второй главы при снятии допущений, принятых в ней. Проанализирован спектральный состав линейного напряжения в точке подключения КПЧ к ПС. Установлено, что наиболее существенными по величине при любом значении частоты инвертирования являются гармоники, порядок которых определяется выражением:

$$k = \left[\frac{2 \cdot f_H \cdot n}{f_S} \pm 1 \right],$$

где $n=1,2,3,\dots$ – ряд натуральных чисел, f_S – частота напряжения ПС.

Помимо спектрального состава напряжения U_S большое значение имеет величина коэффициента искажения синусоидальности (K_U). Параметры схемы, оказывающие наиболее существенное влияние на величину K_U , это – мощность ПС, характеризующаяся долей сопротивления ПС в общем сопротивлении контура коммутации выпрямителя – $q = x_S / n^2 x_k$, реактанс сглаживающего реактора – x_d , относительная величина собственной частоты контура коммутации выпрямителя – v . В таблице приведены расчетные значения K_U при различных соотношениях этих параметров для КПЧ мощностью 1 МВт, подключенного к ПС с номинальным напряжением 10 кВ.

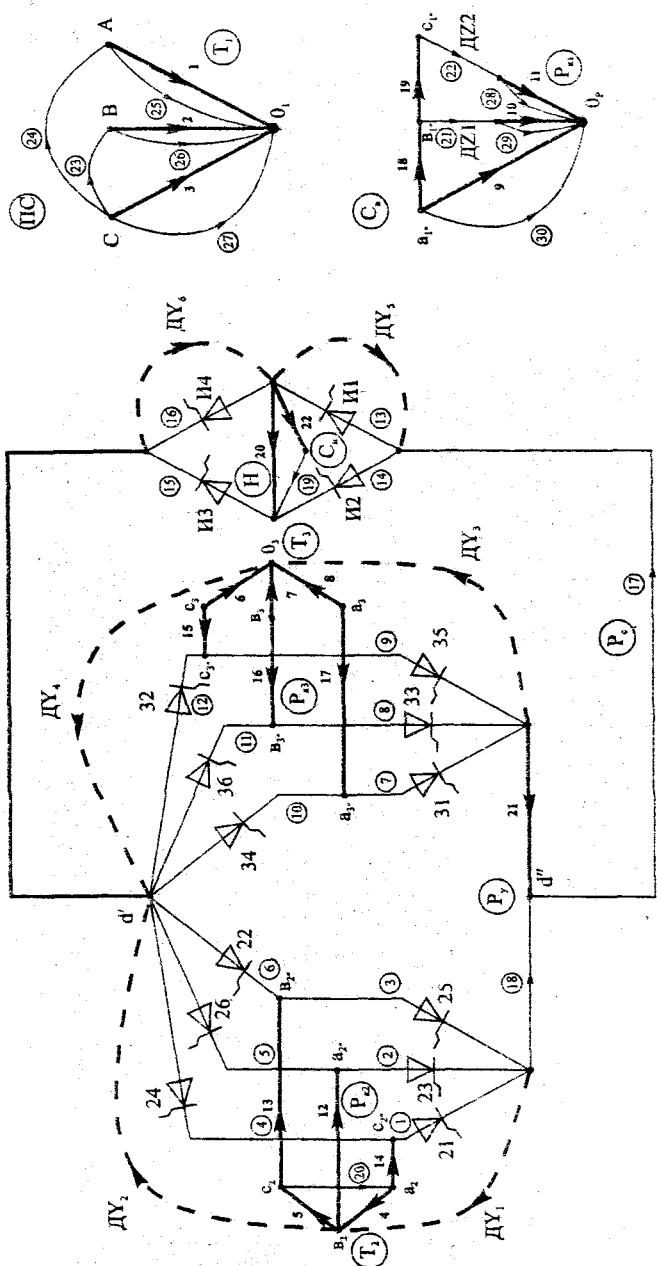


Рис. 5. Граф электрической цепи "ПС - симметричный компенсированный выпрямитель - сглаживающий реактор - АНТ - нагрузка"

Таблица. Значения K_U при различных параметрах схемы

В процентах

$q=0,2; x_{d*}=23,53$				$q=0,1; v=6$				$q=0,3; v=6$			
$v=0$		$v=6$		$x_{d*}=23,53$		$x_{d*}=11,76$		$x_{d*}=23,53$		$x_{d*}=47,06$	
$f_{II}, Гц$	$f_{II}, Гц$	$f_{II}, Гц$	$f_{II}, Гц$	$f_{II}, Гц$	$f_{II}, Гц$	$f_{II}, Гц$	$f_{II}, Гц$	$f_{II}, Гц$	$f_{II}, Гц$	$f_{II}, Гц$	$f_{II}, Гц$
250	500	250	500	250	500	250	500	250	500	250	500
2,57	4,06	4,67	3,87	2,19	2,2	2,9	2,84	7,45	5,96	6,21	5,03

При оценке влияния величины v установлено, что уменьшение емкости батарей конденсаторов компенсирующего устройства (КУ) выпрямителя приводит к увеличению нелинейных искажений напряжения сети. Однако при изменении частоты инвертирования зависимость K_U от величины v не является однозначной и как видно из таблицы может уменьшаться, хотя это уменьшение незначительное. В целом при переводе КПЧ в компенсированный режим работы коэффициент K_U при неизменных величинах q и x_d меньше нормально допустимого значения для напряжения 10 кВ, согласно ГОСТ 13109-97.

В свою очередь, увеличение реактанса x_d сглаживает коммутации АИТ в звене постоянного тока, уменьшая амплитуду колебаний тока I_d . Это благоприятно сказывается на величине K_U в точке подключения к ПС. Однако воздействие величины x_d на коэффициент K_U нелинейно и при дальнейшем увеличении значений x_d коэффициент K_U улучшается в меньшей степени. Поэтому следует находить такое значение реактанса x_d , при котором коэффициент K_U будет находиться в пределах, требуемых ГОСТ 13109-97.

Наиболее существенно уровень высших гармоник в напряжении ПС зависит от величины q . Чем больше мощность ПС ($q=0,1$), тем меньше влияние на ее напряжение оказывает КПЧ. При этом, изменение реактанса x_d не оказывает существенного воздействия на величину K_U . А снижение мощности ПС ($q=0,3$) ведет к значительным искажениям ее напряжения при подключении такого же КПЧ. Тогда даже увеличение реактанса x_d вдвое не позволяет обеспечить коэффициент K_U , удовлетворяющий нормально допустимым значениям для указанного выше номинального напряжения ПС, согласно ГОСТ 13109-97.

На цифровой модели исследованы так же динамические процессы КПЧ для компенсированного режима работы выпрямителя ($v \approx 6$). Подтвержден ранее сделанный вывод о целесообразности использования выпрямителя без управления, либо осуществление фазового регулирования в узком диапазоне. При этом КПЧ имеет наилучшие энергетические показатели, минимальные амплитуды напряжений на вентильях и конденсаторах выпрямителя.

Большое значение имеет процесс отключения КПЧ. Он должен складываться из двух этапов. На первом этапе накопленная энергия реактивных элементов схемы возвращается в ПС (безконтактное

отключение АИТ). А на втором – происходит собственно отключение автоматическим выключателем АИТ. На первом этапе выпрямитель должен быть переведен в инверторный режим с сохранением направления тока в звене постоянного тока. Для этого углы управления выпрямителем устанавливаются больше 120 эл. град.. В некомпенсированных схемах они не более 150 эл. град., так как дальнейшее увеличение приводит к срыву инвертирования. Поэтому скорость рекуперации энергии в ПС ограничивается этим параметром. Для компенсированных схем, устойчивости в инверторном режиме в зависимости от v может сохраняться при $\alpha=180$ эл. град. и более. Это позволяет существенно увеличить скорость отвода энергии из схемы, что очень важно в аварийных ситуациях.

Четвертая глава посвящена экспериментальному исследованию электромагнитных процессов КПЧ и разработке инженерной методики расчета КПЧ. Для подтверждения свойств КПЧ, полученных при цифровом моделировании, в лаборатории “Силовой электроники” кафедры “Системы электроснабжения” ЮУрГУ на имеющейся установке была разработана и выполнена физическая модель по схеме на рисунке 1.

Полученные данные экспериментально подтверждают, что и выпрямитель и АИТ могут работать совместно при любой степени компенсации. При $v \approx 6$ получен наиболее энергетически выгодный режим практически без потребления реактивной мощности. Из экспериментальных кривых следует, что в области оптимальной работы комплекса возрастание жесткости внешней характеристики выпрямителя повышает выпрямленное напряжение на 4–5 % по сравнению с некомпенсированным режимом. Внешняя характеристика выпрямителя жесткая. Это оказывает влияние на величину активной мощности в нагрузке. При этом величина $\text{tg}\varphi_{\text{П}}$ на входе преобразователя меньше на 0,2, что говорит о снижении потребления реактивной мощности. А напряжение на нагрузке так же увеличивается на 5–6 %.

На рисунке 6 приведены осциллограммы установившихся процессов комплекса в режиме компенсации ($v \approx 6$), близком к повторной проводимости вентилей выпрямителя (рисунок 6, а), в режиме с повторной проводимостью (рисунок 6, б) и в некомпенсированном режиме (рисунок 6, в). Согласно этим рисункам КПЧ выполняет свою основную функцию преобразования частоты. В выпрямленном напряжении наблюдаются видоизменения, связанные с коммутациями в АИТ. Эти изменения не оказывают влияния на форму напряжения на конденсаторах КУ. Неполная компенсация реактивной мощности в точке подключения преобразователя к ПС обусловлена значительной величиной тока намагничивания трансформатора физической модели. Однако компенсирующие свойства КПЧ хорошо демонстрирует зависимость величины $\text{tg}\varphi_{\text{П}}$ от выпрямленного тока при различных значениях емкости КУ (рисунок 7).

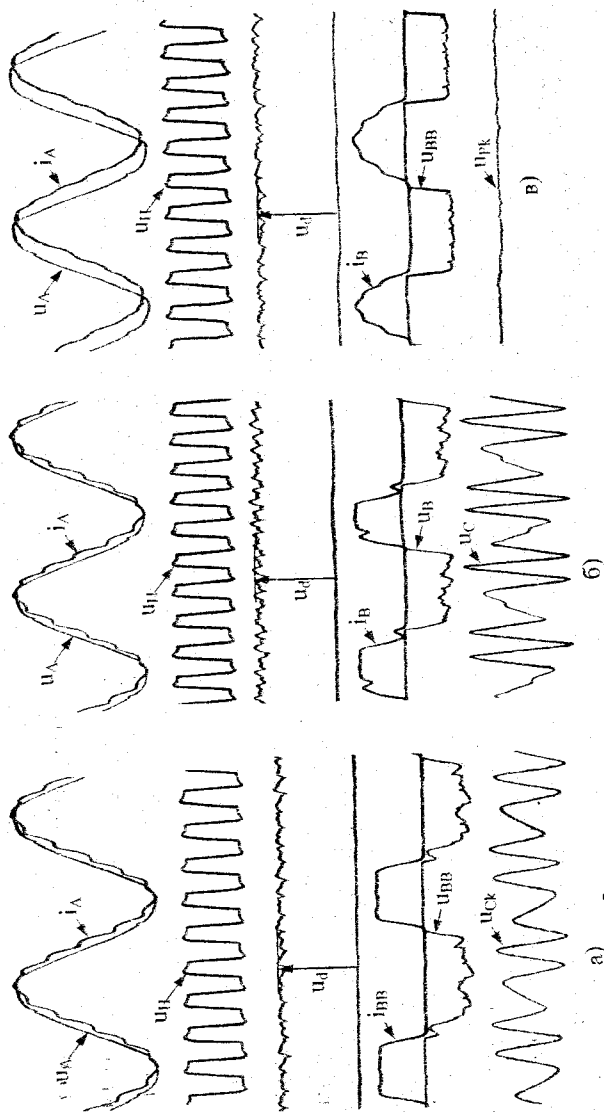


Рис. 6. Осциллограммы установившихся электромагнитных процессов:
 а) режим близкий к повторной проводимости вентилей выпрямителя;
 б) режим с повторной проводимостью;
 в) некомпенсированный режим с реактором КУ

В этой же главе приводится описание разработанной методики расчета силовых элементов схемы, представленной на рисунке 1. В качестве примера рассчитан преобразователь частоты для индукционной установки плавки металла с емкостью тигла в две тонны.

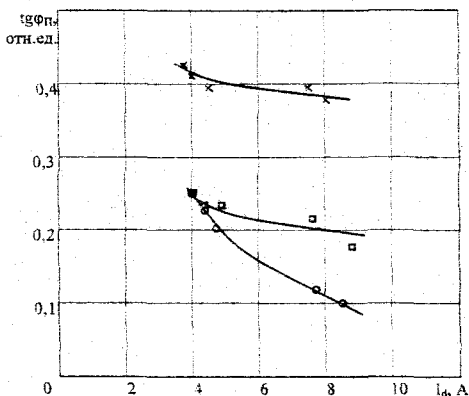


Рис. 7. Экспериментальные энергетические характеристики КПЧ:

- × — некомпенсированный режим ($v=0$);
- — компенсированный режим ($v=6$);
- — второй компенсированный режим ($v=8$)

Приложения к диссертационной работе. В приложении 1 представлены программы расчета статических характеристик КПЧ в среде MatchCad. В приложении 2 приведена разработанная на языке Fortran программа для расчета КПЧ с учетом индуктивного сопротивления сглаживающего дросселя, активных сопротивлений и токов намагничивания, позволяющая проводить исследования установившихся и переходных процессов, спектральный и энергетический анализ свойств КПЧ. В приложении 3 представлены документы о внедрении результатов работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе представлено новое решение актуальной научно-технической задачи — исследование работы компенсированных выпрямителей на нагрузку с изменяемой топологией. При этом получены следующие основные результаты.

1. Анализ современного состояния проблемы создания энергоэффективных ПЧ подтвердил необходимость исследования комплекса на основе компенсированного выпрямителя и АИТ.
2. Предложена новая схема ПЧ со звеном постоянного тока, обладающего высокими показателями электромагнитной совместимости с ПС и выгодными массогабаритными показателями.
3. Получена аналитическая связь основных параметров компенсированного выпрямителя с параметрами АИТ при общепринятых допущениях. Это позволило обобщить теорию КПЧ, где вариант питания АИТ от некомпенсированного выпрямителя является частным случаем.
4. Анализ результатов, полученных с помощью цифровой модели, показал, что КПЧ может устойчиво работать во всех известных номинальных режимах выпрямителя и АИТ.
5. Разработана инженерная методика расчета КПЧ с оптимальными параметрами схемы и массогабаритными показателями, учитывающая требования технологии, системы электроснабжения и параметры ПС.
6. Выработаны рекомендации по использованию предложенной схемы КПЧ.
7. Эксперименты, проведенные на разработанной и выполненной физической модели КПЧ, подтвердили теоретические исследования и показали возможность эффективной компенсации реактивной мощности, потребляемой ПЧ.
8. Результаты теоретических исследований приняты к использованию «Южноуральским арматурно-изоляторным заводом» в перспективе развития производства и внедрены в учебный процесс ЮУрГУ в курсах «Основы энергосберегающей энергетической электроники» и «Системы электроснабжения на основе устройств силовой преобразовательной техники».

Материалы диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Хохлов Ю. И., Титов И. П., Никулин Д. Н., Дзюба М. А., Прохоров В. В. Энергосбережение в системах электроснабжения// В кн.: Стратегия энергосбережения. Региональный подход. — Челябинск: Южно-Уральский издательско-торговый дом, 1999. — С.178–185.
2. Хохлов Ю. И., Дзюба М. А. Новые компенсированные преобразователи частоты для реализации энергосбережения в металлургии и электротранспорте// Международная научно-техническая конференция «Уральская металлургия на рубеже тысячелетий»: Тезисы докладов. — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 1999. — С. 190–191.
3. Хохлов Ю. И., Дзюба М. А. Новые энергоэффективные источники питания в электротранспорте, электроприводе и электротехнологии// Энергосбережение в промышленности и в городском хозяйстве: Сб. тезисов докладов научно-практической конференции. — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2000. — С.7–8.

4. Хохлов Ю.И., Дзюба М.А., Хусаинов Ш.Н. Исследование компенсированного преобразователя частоты// Вестник ЮУрГУ, серия «Энергетика». — Выпуск 1. — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2001. — № 4. — С.38–43.
5. Дзюба М.А., Хохлов Ю.И. Компенсированные преобразователи частоты// Межотраслевая научно-техническая конференция «Дни науки ОТИ МИФИ»: Тезисы докладов. — Озерск Челябинской обл.: Изд-во ООО «Форт Диалог – Исеть», 2002. — С.138–139.
6. Хохлов Ю.И., Дзюба М.А., Сорокин Е.В. Принципы построения и основные характеристики компенсированного преобразователя частоты// Научно-техническая конференция «Электроснабжение, электрооборудование, энергосбережение»: Тезисы докладов. — Новомосковск, 2002. — С.142–144.
7. Хохлов Ю.И., Дзюба М.А. Статические характеристики компенсированного преобразователя частоты// Вестник ЮУрГУ, серия «Энергетика». — Выпуск 3. — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2003. — № 11. — С. 30–35.

Издательство Южно-Уральского государственного
университета

Подписано в печать 09.11.2004. Формат 60×84 1/16. Печать
офсетная. Усл. печ. л. 0,93. Уч.-изд. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ
336/416.

УОП Издательства. 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.