

05.09.03 Э1Ю
Л 813

На правах рукописи

Лохов Сергей Прокопьевич

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ
ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПЛЕКСОВ С ВЕНТИЛЬНЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ

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

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
доктора технических наук

pl

Челябинск 2000

Работа выполнена в Южно-Уральском государственном университете на кафедре "Электропривод и автоматизация промустановок" (ЭПА).

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

Казаринов Л.С.,

доктор технических наук, профессор

Бутырин П.А.,

доктор технических наук, профессор

Изаков Ф.Я.

Ведущее предприятие ОАО "Мечел-ЧМЗ".

Защита состоится 31 мая 2000 г., в 10 часов,
на заседании диссертационного совета Д.053.13.07 при
Южно-Уральском государственном университете по адресу:
454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЮУрГУ.

Автореферат разослан апреля 2000 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д.035.13.07
д.т.н., профессор

Сидоров А.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.

Широкое внедрение мощных полупроводниковых преобразователей сделало актуальным вопрос повышения их энергетической эффективности. В диссертации рассматриваются способы повышения эффективности больших групп преобразователей переменного напряжения для электропечей сопротивления, где это повышение достигается только изменением законов управления и регулирования ими без разработки схем силовой электроники, которые являются предельно простыми (тиристорные ключи в цепях активных нагрузок). В подобных преобразователях самой эффективной является известная импульсная модуляция на низкой частоте (ИМ-НЧ), когда тиристоры включаются с нулевыми углами задержек, без потребления реактивной мощности в без радиопомех. Результаты диссертации применимы и к выпрямителям.

Для теоретического обоснования законов управления требуется решение задачи оценки энергетической эффективности обобщенных нелинейных нагрузок в промышленных сетях. Эта задача является частью широкой проблемы электромагнитной совместимости произвольных электроприемников в системах управления и регулирования. Сформировались даже направления решения этой важной задачи, которые иногда объединяют общим вопросом создания "теории реактивной мощности нелинейного элемента" и компенсации этой мощности.

Основной функцией преобразователя является обеспечение технологического процесса энергией нужного качества, а задача повышения его энергетической эффективности является побочной. Поэтому проблемы повышения энергетической и технологической эффективностей приходится решать одновременно. Рассматриваемый комплекс с точки зрения задач управления становится многосвязным. Только одновременный учет всех ограничений позволяет найти решения, близкие к оптимальным.

В данной диссертации объектом управления являются комплексы с преобразователями переменного напряжения, преимущественно для электронагрева, и частично выпрямители для электропривода. Эти разные объекты исследований объединены одинаковыми общими закономерностями ухудшения энергетических показателей при регулировании напряжения нагрузки, а также принятым в диссертации

путем повышения этих показателей за счет явного или неявного эффекта параллельной работы электроприемников от одной сети электропитания, когда удается процесс взаимокомпенсации сделать управляемым.

Нагреватели печей сопротивления часто включают через печной трансформатор, поэтому без решения побочной проблемы включения трансформатора тиристорами на первичной стороне широкое внедрение ИМ-НЧ регулирования электропечей оказалось бы невозможным.

В работе обобщены итоги 30-летней деятельности автора по вышеуказанным проблемам в качестве ответственного исполнителя и руководителя хоздоговорных работ, проводимых Южно-Уральским государственным университетом по комплексному плану КНП-2000 по приказу Минвуза СССР 485, в также ряда НИР, ОКР и договоров о содружестве с головным институтом ВНИИЭТО (г.Москва), объединением "Уралзлектротяжмаш" (г. Екатеринбург), ЗПО "Преобразователь" (г. Запорожье), ОАО "Мечел-ЧМЗ" (г. Челябинск), Опытным заводом НИИ з-да "Эдектровырямитель" (г. Саранск), заводами "Кристалл" и "Радиокерамика" (г. В.Уральск) и другими.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ. Повышение энергетической и технологической эффективности комплексов с вентильными преобразователями (в частности, с группами преобразователей переменного напряжения с ИМ-НЧ для электропечей сопротивления) как за счет разработки законов оптимального управления этими преобразователями по нескольким координатам, так и за счет разработки теоретических основ распределения ответственности за неоптимальное энергопотребление этими преобразователями.

ИДЕЯ РАБОТЫ заключается в использовании предельно упрощенных моделей электротехнических комплексов с управляемыми вентильными преобразователями и их нагрузками для достижения поставленной цели. Под предельно упрощенной понимается такая модель, дальнейшее упрощение которой исследователь считает невозможным с точки зрения решаемой задачи.

НАУЧНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Оценку энергетической эффективности предлагаемых законов управления объектами энергопотребления предлагается проводить на

основе анализа тепловых процессов в предельно упрощенной модели трансформатора электропитания всех электроприемников, решая задачи как максимально возможного использования этого трансформатора (включая срок его службы) при одних ограничениях, так и минимизации потерь энергии в нем при других ограничениях, но всегда при произвольных формах электрических сигналов (напряжения и токи). Это обосновывает предлагаемые разложения электрических сигналов электроприемника на энергетические составляющие (активная и т.д.), - объективно определяет необходимые интегральные понятия (полная мощность, коэффициент мощности и т.д.), устанавливает связь квадрата полной мощности с нагревом трансформатора.

2. Распределение ответственности за энергетически неэффективно энергопотребление (за квадрат суммарной полной мощности) между электроприемниками предлагается представить в виде суммы (баланса) функциональных преобразований сигналов сети питания и сигналов каждого электроприемника (элемента произвольной нелинейной цепи), получая при этом дальнейшие разложения сигналов на энергетические составляющие, каждая из которых объективно связана с тепловыми процессами в общем трансформаторе питания.

3. Определение технологической эффективности преобразователей переменного напряжения для электропечей сопротивления предлагается производить по размаху колебаний температуры предельно упрощенной модели печи сопротивления, что позволяет разработать новые законы ИМ-НЧ модуляции, повышающие до предела этот показатель, и пересмотреть установившиеся взгляды на дискретность ИН-НЧ регулирования при этом.

4. Повышение энергетической эффективности комплекса вентильных преобразователей с их нагрузками, и произвольных электроприемников достигается за счет эффекта взаимокомпенсации найденных энергетических составляющих при явной или неявной параллельной работе электроприемников. Для максимального использования этого эффекта в законах управления преобразователями по некоторым координатам изучены закономерности качественного и количественного изменения этих составляющих при регулировании в указанном классе преобразователей.

5. Принципы построения систем управления обобщенными вентильными преобразователями и ИМ-НЧ преобразователями для

электропечных комплексов, повышающие их энергетическую и технологическую эффективность.

6. Решения возникающих при внедрении практических вопросов, связанных с динамической устойчивостью комплексов с ИМ-НЧ преобразователями, с включением нагрузок этих преобразователей через печные трансформаторы, с устранением потока вынужденного подмагничивания преобразовательного трансформатора выпрямителя с нулевыми вентилями (это пример- неявной параллельной работы электроприемников).

ОБОСНОВАННОСТЬ И ДОСТОВЕРНОСТЬ НАУЧНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ, ВЫВОДОВ И РЕКОМЕНДАЦИЙ. В теоретических предложениях диссертации использованы простые формулы и модели, исключающие возможность появления незамеченных ошибок. Все окончательные формулы сопровождены примерами расчетов на цепях с малым числом элементов, что допускает их независимую проверку. При выводах корректно использованы известные методы математики и теоретических основ электротехники. Предлагаемые реализации схем измерений просты для структурного анализа, выполняемы на доступных микросхемах малой степени интеграции. Предложенные схемы вентильных преобразователей и систем управления ими проверены в лабораторных и заводских условиях и, в большинстве своем, внедрены в производство.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ. В теоретических исследованиях использовались традиционные методы матанализа, включая вариационные методы, методы математической статистики, функций комплексного переменного. Применялись приемы теории автоматического управления (ТДУ). наиболее часто метод точечных отображений для анализа дискретных по уровню, и времени многомерных систем управления.

НАУЧНОЕ ЗНАЧЕНИЕ РАБОТЫ состоит в решении важной научно-технической проблемы повышения энергетической и технологической эффективности комплексов с вентильными преобразователями путем предлагаемых оценок этих эффективностей, нахождения закономерностей их изменения при регулировании и использования при управлении преобразователями.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ РАБОТЫ состоит в существенном развитии самого экономного из известных путей повышения энергетической эффективности технологических комплексов (преимущественно групп электропечей сопротивления с посторонними потребителями) только синтезом законов управления вентильными преобразователями при предельно простой их силовой части.

РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ. Основное производство Южно-Уральского завода "Кристалл" переведено на представленные в данной диссертации трехфазные преобразователи переменного напряжения с ИМ-НЧ (выпущены одной серией Опытным заводом НИИ завода "Электровыпрямитель" г. Саранск), на однофазные преобразователи переведены электропечи одного цеха завода "Радиокерамика" в том же городе, все главные электроприводы 6-клетевого стана 1700 листопрокатного цеха 1 горячей прокатки АО "Мечел" (ЧМЗ) переведены на выпрямители по данной диссертации.

Разработанная схема универсального импульсного и фазового преобразователя для работы на первичной стороне однофазного печеного трансформаторе успешно испытана на многих производствах на малоинерционных установках лучевого нагрева в режиме ИМ-НЧ с предельно высокой частотой включений.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ. С 1985 года основные положения диссертации докладывались, обсуждались и получили одобрение на 20 международных, Всесоюзных, региональных и университетских научно-технических конференциях, в т.ч. VII Всесоюзная конференция "Силовая полупроводниковая техника" в Запорожье (1985), III Всесоюзное совещание "Проблемы электромагнитной совместимости" в Таллине (1986). I Всесоюзная конференция по теоретической электротехнике в Ташкенте (1987), VII Всесоюзная конференция "Силовая полупроводниковая техника" в Миассе (1989), Всесоюзная конференция "Современные методы и средства быстродействующего преобразования режимных параметров энергосистем" в Челябинске (1990), V Всероссийская конференция "Пути улучшения энергетических и массо-габаритных показателей" в Челябинске (1993). Международная конференция "Силовая электроника" в Алуште (1993), кафедра ТОЭ МЭИ (два раза), ежегодные конференции по итогам НИР Южно-Уральского государственного университета.

ПУБЛИКАЦИИ. Основное содержание диссертации опубликовано в 120 печатных работах и изобретениях, в том числе 68 печатных работы, включая 1 монографию, 2 учебных пособия по теме и 11 статей в центральной печати, и 52 изобретения, включая 1 патент России.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ РАБОТЫ. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, перечня сокращений и основных понятий, списка литературы 272 наименований и приложений. Общий объем диссертации 244 страницы, в том числе 202 страницы машинописного основного текста, 74 рисунка, 22 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ВО ВВЕДЕНИИ определена решаемая в диссертации научно-технические проблема, обосновывается ее актуальность.дается характеристика общей структуры работы и основных положений, выносимых на защиту, поясняются некоторые вводимые термины.

Решается проблема оптимального управления электротехническими комплексами и распределения ответственности за неоптимальное энергопотребление между объектами комплексов (электроприемниками). Требуется обоснование критериев оптимизации, мировые системы энергорасчетов различны, но по сути сводятся к двум ставкам:

1) за электроэнергию (за уголь);
2) за загрузку энергосистемы (за трансформатор и потери в нем). Эта двойственность носит объективный характер, она отражена с существующих в России двухставочных тарифах, но в них расчеты по второй ставке сложнее принятого в диссертации подхода, хотя качественно не противоречат ему.

Теоретические анализы энергопроцессов принято производить через мощности, а не анергии. Тогда расчеты за активную мощность сети P_S по первой ставке осуществляются согласно уравнению баланса (суммы мощностей отдельных k-х электроприемников P_k (1 а)):

$$P_s = \sum_{k=1}^N P_k \text{ (а)}, \quad Q_s = \sum_{k=1}^N Q_k \text{ (б)}, \quad S_s^2 = P_s^2 + Q_s^2 \text{ (в)}. \quad (1)$$

Загрузку энергосистемы определяет полная мощность сети S_s , которая при синусоидальных формах напряжений и токов (сигналах) выражается через активную (1 а) и реактивную Q_s (1 б) мощности сети формулой (1 в) их квадратичного баланса.

Вводится терминология. Соединение элементов типа (рис. 1, 2), когда сигналы одного не влияют на сигналы другого названо "сетью", а общий случай соединения (рис. 3, 4) - "цепью". Для элементных составляющих баланса 4-й степени к формуле квадрата полной мощности (1 в) введен дежурный термин "ответственность", который, впрочем, можно применять к любым балансам, даже известным: "Мощность элемента 2 Вт" или иначе "Ответственность элемента перед источником питания цепи составляет 2 Вт".

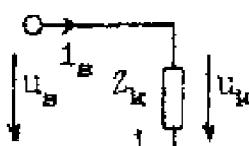


Рис.2 Сети

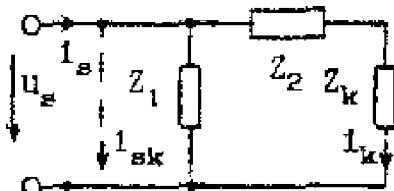


Рис.3. Однофазная цепь

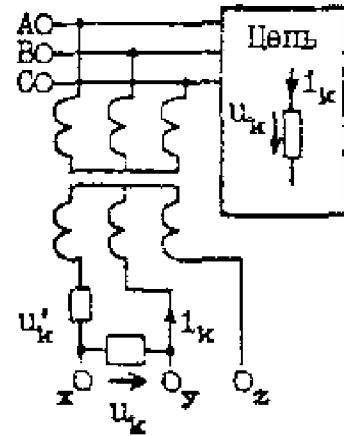


Рис.4. Трехфазная цепь

У мощных преобразователей КПД высоки и почти не зависят от законов управления ими. Поэтому повышение энергетической эффективности связывают только со второй ставкой энергорасчетов, со снижением полной мощности (1 в). При этом возникают два подвопроса:

- 2а) как потреблять электроэнергию с минимальными потерями;
- 2б) как справедливо распределять ответственность между электроприемниками за загрузку общего для них трансформатора.

В ПЕРВОЙ ГЛАВЕ с разных сторон анализируются вопросы оптимального энергопотребления в самой простой сети (рис. 1), состоящей из однофазного источника энергии без потерь с произвольными формами напряжения U_s и тока i_s и ОДНОГО нелинейного электроприемника с напряжением U_k и током i_k .

В схеме (рис. 1) сигналы сети и электроприемника совпадают, и их можно обозначить без индексов u и i . Вначале предполагается короткопериодичность сигналов, т.е. они имеют такой период T_i , что колебаниями температуры трансформатора источника питания из-за нагрева его колеблющимся током можно пренебречь. На рис.1 и дальнейших рисунках не показан предполагаемый сетевой (фидерный)

трансформатор. В этих условиях для сигналов справедливы общепринятые интегральные определения мощности P (2 а), среднеквадратичного напряжения U (2б) и среднеквадратичного тока I (2 в). В этих формулах использовано удобное обозначение скалярного произведения двух сигналов, которое перенесено из векторного анализа на функции времени. Далее появятся другие "мощности", поэтому при противопоставлениях мощность P называют "активной" P_a :

$$P = P_a = \frac{1}{T_1} \int_{t_0}^{T_1} u * i dt = (u, i) \text{ (а)}, \quad U^2 = (u, u) \text{ (б)}, \quad I^2 = (i, i) \text{ (в)}. \quad (2)$$

Вариационными методами решены две оптимизационные задачи:

1) передачи (потребления) МАКСИМАЛЬНОЙ мощности P_{\max} при неизменном по форме напряжении сети со среднеквадратичным значением U^2 и токе с новой оптимальной формой $i_{\text{опт}}$ (3 а), но при том же среднеквадратичном значении I^2 (2 в);

2) передачи мощности P (2 а) при той же форме напряжения, но при новом токе i_{π} (3б) с МИНИМАЛЬНЫМ среднеквадратичным значением:

$$i_{\text{опт}} = \frac{I}{U} * u \text{ (а)}, \quad i_{\pi} = \frac{P}{U^2} * u \text{ (б)}. \quad (3)$$

Решение первой задачи приводит к определению понятия "полная мощность" сети $S = P_{\max} = U * I$, а второй - к определению понятия "активная составляющая" тока i_{π} и к определению ее ортогональной невязки i_{π} "пассивная составляющая" (4 а) по Фризе (Fryze S. Wirk-, Blind-und Scheinleistung in elektrischen Stromkreisen mit nichtsinusformigen Verlauf von Strom und Spannung. – Elektrotechnische Zeitschrift. 1932 –H25, 26, 29, –S. 596-599, 625-627, 700-702). Она ортогональна активной составляющей (4 б) и вместе с ней участвует в ортогональном балансе (4 в):

$$i_{\pi} = i - i_a \text{ (а)}, \quad (i_a, i_{\pi}) = 0 \text{ (б)}, \quad I^2 = I_a^2 + I_{\pi}^2 \text{ (в)}. \quad (4)$$

Умножение в (4 в) квадрата тока I^2 на U^2 приводит к квадрату полной мощности по определению. Доказывается, что такое же умножение I_a^2 приводит к квадрату активной мощности, а умножение I_{π}^2 формально названо Фризе квадратом пассивной мощности

$$S^2 = U^2 * I^2 = U^2 * I_a^2 + U^2 * I_{\pi}^2 = P_a^2 + P_{\pi}^2. \quad (5)$$

Получилась формула Фризе, совпадающая с формулой (1 в) при синусоидальных сдвинутых относительно друг друга сигналах. Из (3), (4) следует, что пассивная составляющая не потребляет энергию ($u, i_p = 0$) и ее можно скомпенсировать.

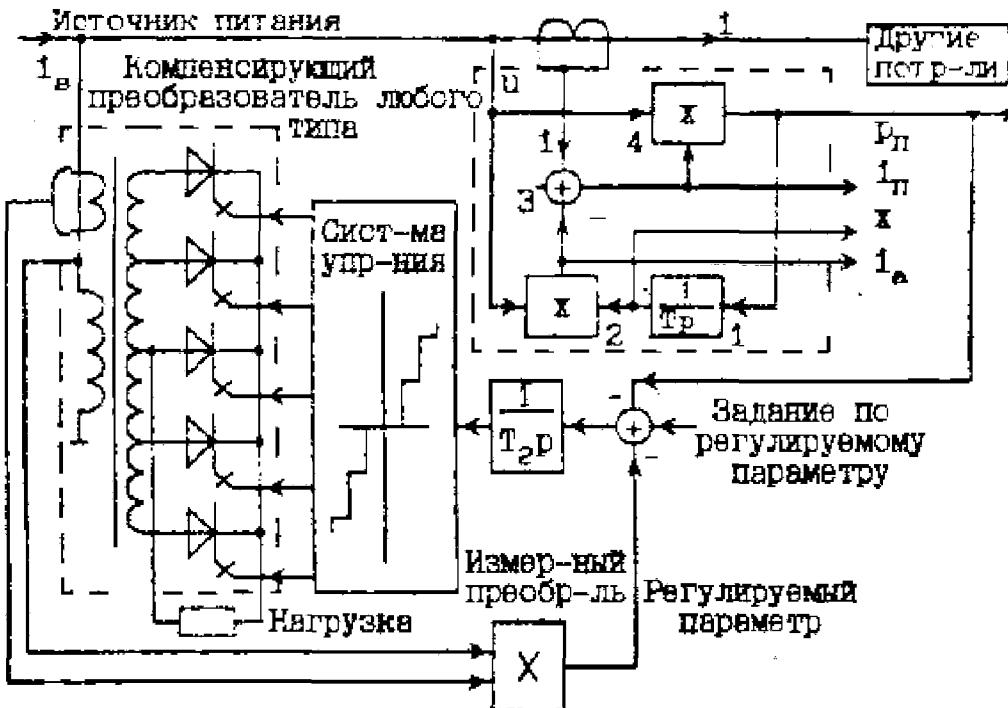


Рис.5. Обобщенный преобразователь энергии с измерительным преобразователем ортогональных составляющих

На (рис. 5) справа сверху штрихами обведена схема выделения описанных ортогональных составляющих. Когда постоянная времени T интегратора 1 гораздо больше периода сигналов T_i , сигнал X на его выходе почти постоянен на периоде и может плавно изменяться от периода к периоду. На выходе умножителя 2 формируется сигнал $i_a = X \cdot u$, как в уравнении (3 б) с точностью до коэффициента. На выходе сумматора 3 получается сигнал пассивного тока в соответствии с уравнением (4 а). На выходе умножителя 4 формируется сигнал $p_p = u \cdot i_p$, среднее значение которого должно быть нулевым ($u, i_p = 0$), иначе разложение не будет ортогональным. Этот сигнал поступает на интегратор 1, с которого начато описание. В замкнутой системе регулирования среднее значение сигнала на входе интегратора 1 равно нулю. Круг логических заключений замкнулся. Таким образом, при короткопериодических сигналах

представленная схема разделяет сигнал тока i на активную i_a и пассивную i_p составляющие.

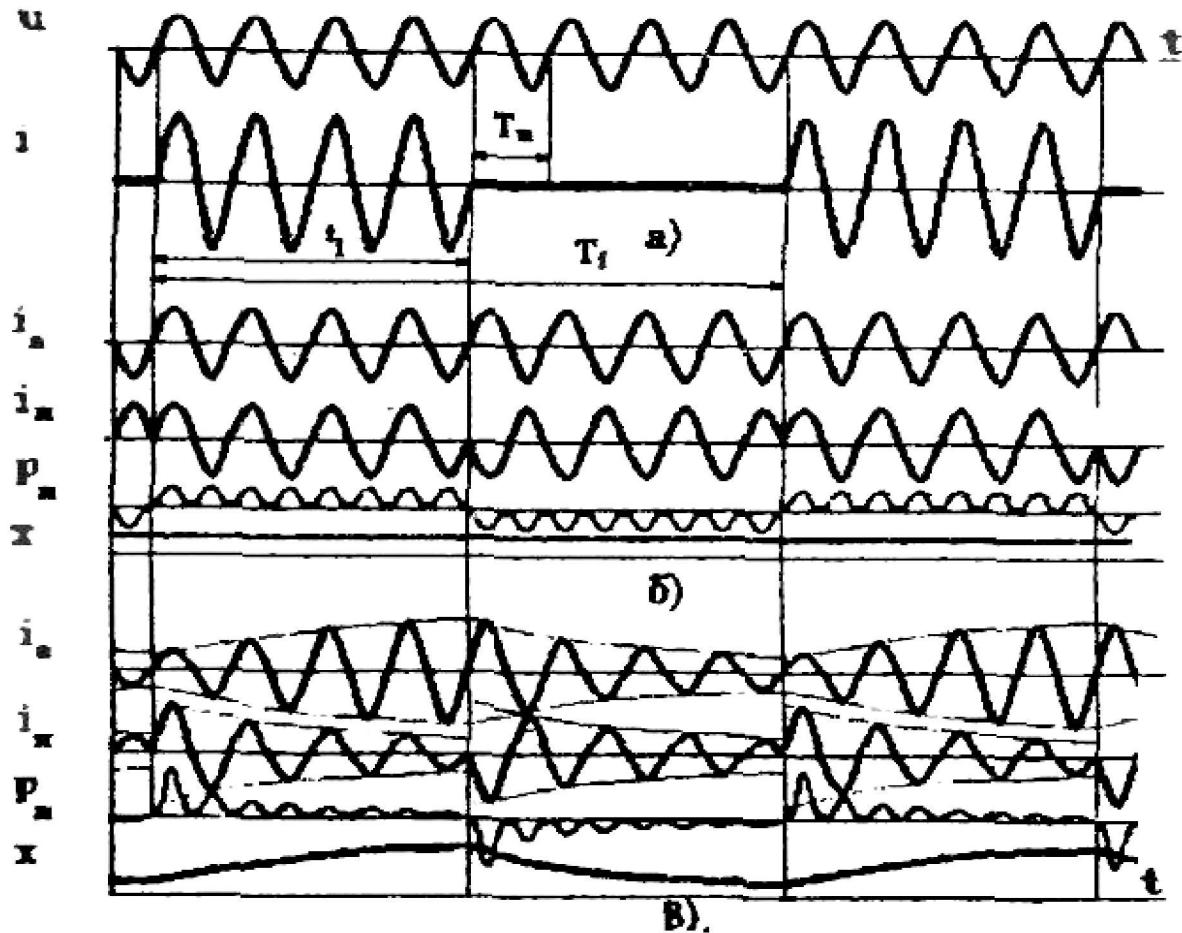


Рис. 6. Разложение сигналов (в) в коротко- (б)
и длиннопериодических (в) процессах

Если постоянные времени нагрева источника питания не позволяют пренебречь колебаниями температуры при колебаниях тока или маневренность (параметр реальных энергоблоков) источника питания невысокая, то такие процессы следует относить к переходным или длиннопериодическим. Тогда в соответствующей схеме разделения надо уменьшить постоянную времени интегратора 1. Сигналы будут изменяться как на (рис. 6 в), плавно будет меняться сигнал X и амплитуда активной составляющей с формой напряжения сети на коротких интервалах рассмотрения. Предлагается так определить поведение активной составляющей в переходных режимах.

С этого момента и далее каждому новому определению или понятию будет соответствовать аналоговая модель для измерения или системы

дифференциальных уравнений. Предлагается назвать это "модельной технологией" определения понятий.

Все изложенное повторено для одного трехфазного электроприемника, определены активные и пассивные составляющие, полная мощность, Предложены схемы измерения (выделения) составляющих. На входы "и" описанных схем измерения можно подавать не напряжения сети, а субъективно выбранные формы сигналов, и схемы позволяют выделять такие же формы из реальных сигналов и формировать ортогональные невязки. Такими формами могут быть линейные напряжения трехпроводной сети. Тогда из фазных токов будут выделены составляющие, которые некоторые ученые определяют "реактивными", а невязками будут составляющие несимметрии и искажений.

Разработанные измерители предложено использовать для управления обобщенными компенсированными или компенсирующими преобразователями любого типа или компенсаторами (рис. 5). На рис. 5 показано применение способа для выпрямителя на полностью управляемых вентилях с переключаемым трансформатором в режиме компенсации "по возмущению" к оптимальной форме, что определяется местом включения трансформатора тока измерителя. Возможен вариант перенесения измерительного трансформатора тока влево на ток сети. Тогда будет работа в режиме стабилизации общего тока "по отклонению" от оптимальной формы. Способ применим для управления инверторами, преобразователями частоты, регуляторами, .отдельными резонансными цепочками. На вход "и" измерителя могут быть поданы другие "энергетически оптимальные формы". Описаны возможности применения способа в трехфазных сетях. Тогда возможна компенсация токов искажений, несимметрии, отдельных гармоник и т.д. по желанию пользователя. Заявка на данный способ управления подана в 1972 году раньше многих теперь известных в мире предложений.

Предложено определять полную мощность одного электроприемника через анализ процессов в трансформаторе, к которому он один подключен, а не по процессам в электроприемнике. Однако налагаемые при этом ограничения приходится принимать достаточно субъективно. Поэтому возможны различные формулы полной трехфазной мощности. Для трехпроводной сети обоснованы вариационными методами несколько

вариантов формул, для дальнейших исследований обоснована и принята известная формула полной мощности через фазные напряжения и токи

$$S^2 = (U_A^2 + U_B^2 + U_C^2)(I_A^2 + I_B^2 + I_C^2). \quad (6)$$

Предложена модель системы электропитания с гипотетическим трансформатором, в котором с изменением числа витков на вторичной стороне меняется толщина провода для постоянно полного заполнения окна. потери в обмотках пропорциональны не I^2 , а U^2*I^2 то есть квадрату полной мощности. Показано, что только такой трансформатор отражает физику электромагнитного преобразования энергии в условиях заданных габаритов. В обычном же трансформаторе с переключением отпаек на вторичной стороне не используется часть меди обмотки, и он не может быть предельно упрощенной моделью, используемой для введения новых интегральных электрических понятий. Это становится физическим обоснованием интегрирования именно квадрата полной мощности. Результат интегрирования получается пропорциональным потерям энергии и количеству теплоты, выделяемой в такой модели источника питания. Этот результат может быть трактован, как "полная энергия", но в иной размерности. По полной мощности выбирается трансформатор источника питания.

Общество постоянно рассчитывается за потери (издержки) в трансформаторе и один раз за его стоимость (капитальные затраты). Старение изоляции связано с ее температурой экспоненциальным законом Аррениуса (снижения срока службы примерно в два раза на каждые 10 градусов перегрева). Учет этого закона позволяет пойти дальше, определить полную мощность в переходных режимах, показать физическую сущность интегрирования результатов полученных функциональных преобразований электрических сигналов и трактовать результат интегрирования выработанным ресурсом трансформатора. Однако в диссертации только указано на такую возможность дальнейших исследований и приведены примеры численных расчетов на модели источника питания с экспоненциальным модулем Аррениуса и "счетчиком ресурса".

Расширенная концепция Фризе имеет дело с одним электроприемником, и для нее бесчисленное множество потребителей сети – один электроприемник с простой схемой включения устройства силовой

электроники, это симметричные тиристорные ключи в цепи однофазной или трехфазной активной нагрузки. Ключи регулируют напряжение различными способами импульсной модуляции. Токи сети и нагрузки таких преобразователей равны, предлагается назвать их преобразователями с непосредственной связью токов сети и нагрузки (НСТЧН).

Если выделить полезную составляющую напряжения нагрузки, то доказано, что произведение КПД на коэффициент мощности таких преобразователей определяется только глубиной регулирования этого действующего значения

$$\eta * \chi = \frac{P_H}{S_s} = U_{ph}/U_s \quad (7)$$

независимо от формы напряжения сети и законов управления реальными ключами в цепи нагрузки с НСТЧН. Вывод был известен для идеального преобразователя с $\chi = 1$ и $U_{ph} = U_h$. Для него полезно ввести понятие тока сети полного включения или номинального тока I_{sh} , и через него выразить действующие значения тока сети при регулировании I_s и его составляющих ортогонального баланса (4 в)

$$I_s = \chi * I_{sh} \text{ (a). } I_a = \chi^2 * I_{sh} \text{ (б), } I_p = \chi * \sqrt{(1 - \chi^2)} * I_{sh} \text{ (в). } (8)$$

Глубина регулирования $U_* = U_h/U_s$ определяет в коэффициент мощности $\chi = U_*$ (7) и величину пассивного тока (8 в) идеального преобразователя с НСТЧН.

Уменьшить пассивный ток можно только путем его взаимокомпенсации с таким же током другого явного электроприемника или самого себя при неявной параллельной работе. Примером последнего является идеальный переключатель отпаек трансформатора активной нагрузки. После представления токов такого преобразователя в виде токов двух электроприемников в одной сети получена формула коэффициента мощности для любых законов переключении отпаек и любой форме напряжения сети в промежутке $1 > U_* > U_{min*}$ напряжения нагрузки до относительного значения напряжения отпайки

$$\chi = \frac{U_*^2}{\sqrt{U_*^2 * (1 + U_{min*}^2) - U_{min*}^2}}. \quad (9)$$

Ранее были известны частные случаи этой формулы для конкретных форм (синусоида) и через промежуточные параметры (угол фазового регулирования), известны ошибочные попытки общего решения.

Из всевозможных способов регулирования переменного напряжения в электропечах сопротивления применяют импульсную модуляцию на основной частоте (ИМ-ОЧ) или фазовое регулирование углом включения и импульсную модуляцию на низкой частоте (ИМ-НЧ), которую называют импульсным, число-импульсным и т.д. регулированием. Чаще всего ИМ-НЧ поясняют на примере широтно-импульсной модуляции ШИМ-НЧ (рис. 6а), указывая, что регулируемым параметром является продолжительность включения (скважность) $\gamma = t_i / T_i$. Отмечали, что сам способ обладает дискретностью регулировочной характеристики ($\gamma = 1/8, 2/8, 3/8$ и т.д. для рис. 6 а при $T_i=6$) и вызывает колебания температуры объекта, но не потребляет реактивную мощность ($\cos \phi = 1$).

Предложено (в 1972 г.) качество регулирования напряжения преобразователя переменного тока оценивать по вызываемым колебаниям температуры объекта, если аппроксимировать тепловую инерцию апериодическим звеном. Предложены способы ИМ-НЧ модуляции сложными колебаниями (рис. 7) релейной обратной связью или частотно-импульсной модуляцией (ЧИМ-НЧ), предельно улучшающие данный показатель качества без дискретности регулировочной характеристики.

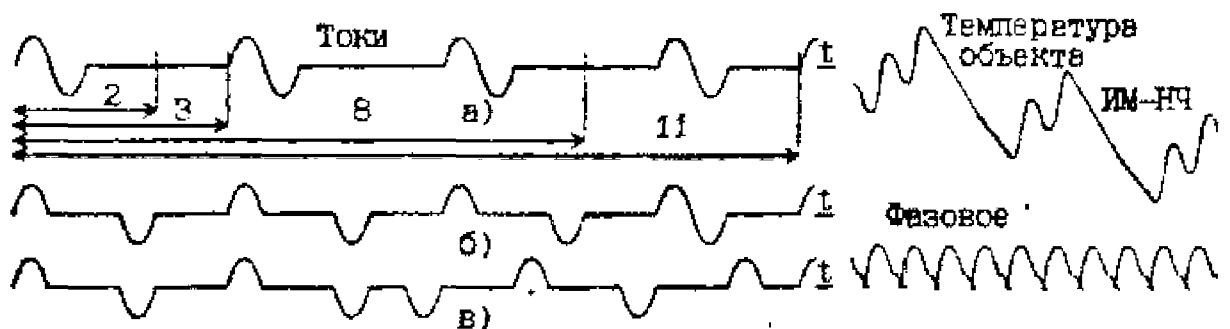


Рис.7. Предлагаемое ИМ-НЧ регулирование полными волнами (а) и полуволнами (б) со знакочередованием и полуволнами без знакочередования (в)

Рис.8. Колебания температуры при ИМ-НЧ по рис.7а и ИМ-ОЧ

Например, задание по скважности $\gamma = 0,367$ может быть выполнено только на периоде $T_i = 1000$, так как дробь $367/1000$ несократимая. В высшей арифметике доказывается, что лучшие приближения к любой дроби осуществляют подходящие дроби. Для примера: $1/2 = 0.5, 1/3 =$

0.3333 , $3/8 = 0.375$, $4/11 = 0.3636$ и т.д. Ток нагрузки при ЧИМ-НЧ модуляции или с помощью интегрирующей релейной обратной связи для данного задания показан на рис. 7 а. Как видно, напряжение нагрузки по характеру соответствует сложным колебаниям, а глубина регулирования за интервалы 2, 3, 8, 11 соответствует указанным подходящим дробям. То есть, не только отсутствует дискретность регулирования за большой интервал, но и за любой малый получается предельно возможное приближение к заданию.

Доказано, что колебания температуры при такой ИМ-НЧ модуляции получаются только в 3.,.6 (для рис. 7 в., а) раз больше, чем при фазовом регулировании переменного напряжения. На (рис. 8) приведены снятые в одном масштабе осциллограммы выхода малоинерционного термоэлектрического преобразователя при ИМ-НЧ типа (рис. 7 а) и при фазовом регулировании (ИМ-ОЧ).

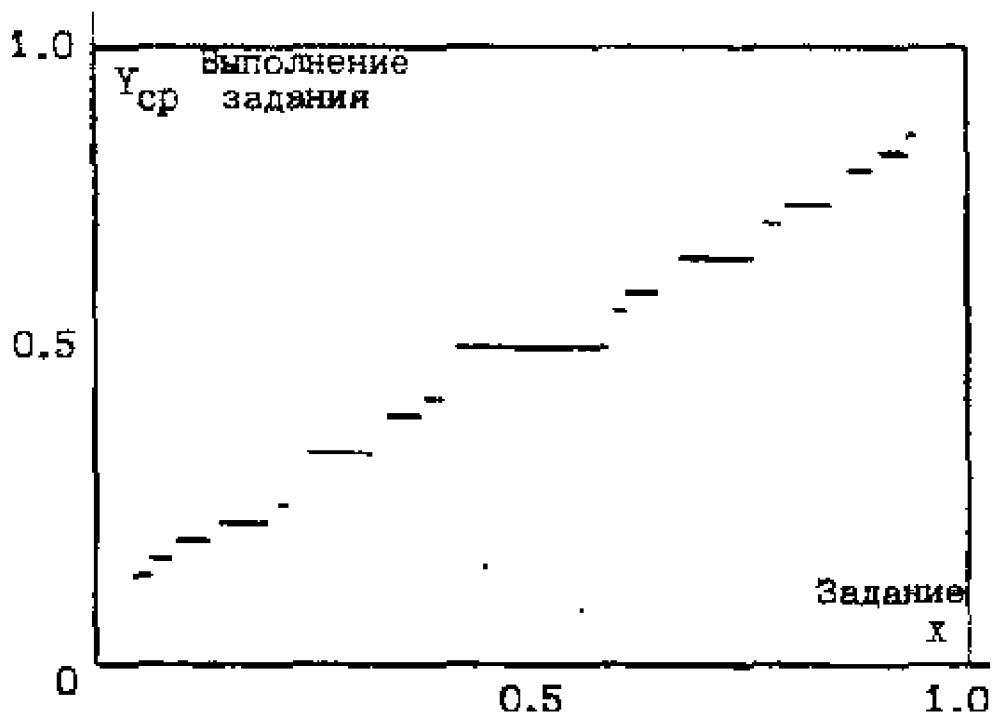


Рис.9. Регулировочная характеристика релейно-импульсной системы

Анализ системы с релейной обратной связью и апериодическим звеном вместо интегратора обнаружил интересные свойства регулировочной характеристики. Она имеет бесконечное число зон нечувствительностей, ширина которых получается больше для значений глубины регулирования, соответствующей более простой подходящей дроби (с меньшим знаменателем) (рис. 9). Анализ этой характеристики дает много интересных результатов, выходящих за пределы темы

диссертации (оптимальное кодирование, распределение простых чисел, принцип тепловой неопределенности). Для начала надо ее сопоставить с известной в математике лестницей Кантора.

Рассчитан положительный эффект явной взаимной компенсации пассивных токов в группах преобразователей переменного напряжения для электропечей сопротивления и произвольных электроприемников при различных способах регулирования. Здесь неоспоримое преимущество принадлежит ИМ-НЧ регулированию вместо способа фазового регулирования. Вероятностными методами доказано, что при независимой (несинхронизированной) работе ИМ-НЧ преобразователей квадрат пассивного тока сети равен сумме квадратов пассивных токов отдельных преобразователей (8 в) и его доля неуклонно падает с увеличением числа преобразователей из-за того, что активные составляющие участвуют в балансе первой степени, как и активные мощности (1 а). Найденная закономерность позволяет рассчитать энергетическую эффективность при любых параметрах регулирования каждого из ИМ-НЧ преобразователей в группе и любого потребителя.

Предельно возможный эффект улучшения групповых энергетических показателей получается при взаимной синхронизации ИМ-НЧ преобразователей поочередно последовательнымиключениями, когда по цепочке последовательного подчинения свободное отключение одного преобразователя приводит к обязательному включению следующего в очереди. Подучены все формулы для этого предельного режима. Авторство на саму идею синхронизации группы преобразователей с ИМ-НЧ принадлежит ученым Гельману М.В., Лабунцову В.А., Обухову С.Г., Рыжкову А.Н., Ярову В.М. и автору данной диссертации. При одинаковой энергетической основе пути реализации способа управления преобразователей возможны разные. В диссертации принят путь ИМ-НЧ модуляции с помощью релейной обратной связи по регулируемому параметру (мощности) и синхронизации путем введения замкнутой релейной системы в режим вынужденных колебаний.

Исследованы процессы в получившейся бесконечной цепочке поочередно синхронизируемых релейно-импульсных систем автоматического регулирования (САР), обнаружены расходящиеся по периоду (обычно исследуют расходящиеся по амплитуде) процессы из-за обязательности выполнения приказов на включение по цепочке взаимного

подчинения. Предложены решения, стабилизирующие систему в более совершенном способе "через последовательной" синхронизации, когда при свободном отключении одного преобразователя включается не следующий по очереди, а ближайший в этой очереди, находящийся на грани естественного включения релейной обратной связью. Тогда повышение энергетической эффективности почти не увеличивает колебания температуры, т.е. не снижает технологическую эффективность.

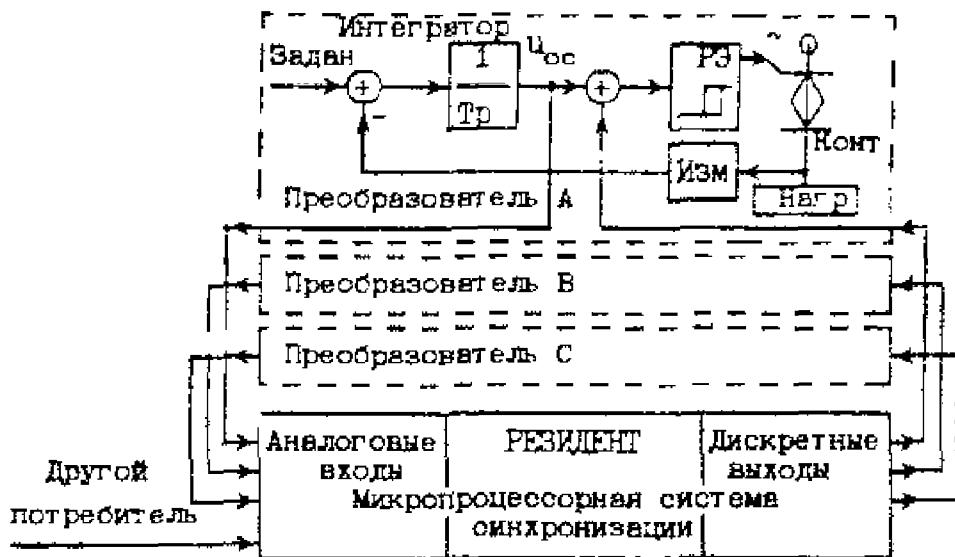


Рис.10. Резидентное управление группой релейно-импульсных систем

Предложен качественно другой способ управления группой ИМ-НЧ преобразователей, работающей параллельно с любым потребителем с резко переменной нагрузкой (рис. 10, 11). При нем центральная система управления (Резидент) собирает информацию о состояниях всех преобразователей и о токе потребителя и принимает решение, кому включаться на следующем импульсном интервале. Показано, что достаточно иметь информацию о сигналах с выходов интеграторов в контурах релейной обратной связи (рис. 10). Более того, степень дискретизации этой информации может быть доведена до 1 бита, то есть достаточно подключить к выходам интеграторов не аналого-цифровые преобразователи, а нуль-органы. Это упрощает практическую реализацию предложения (рис. 10). Описаны алгоритмы управления, по которым и построены на ЭВМ графики (рис. 11).

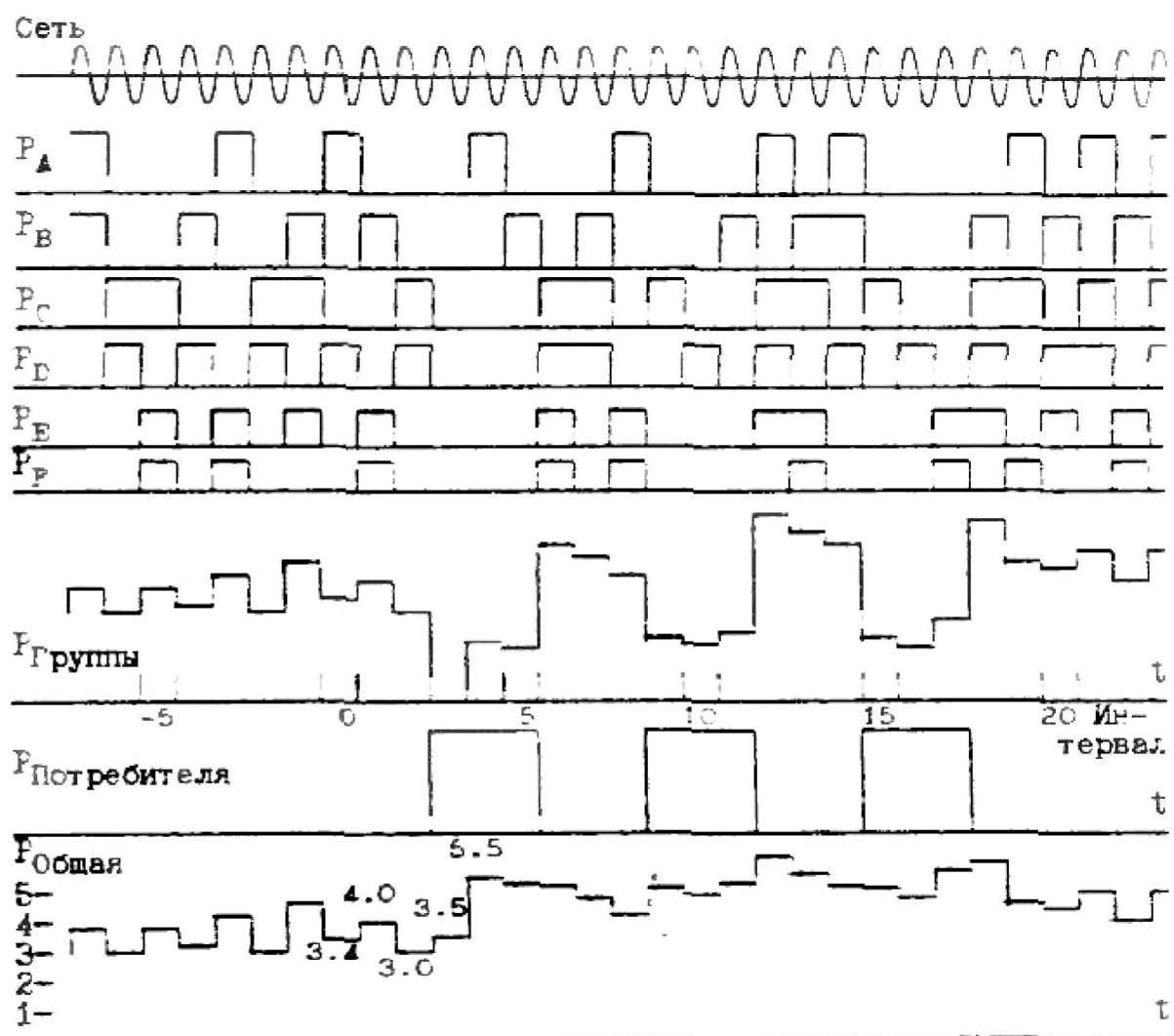


Рис. 11. Графики мощностей при резидентном управлении

Показано, что включать печной трансформатор надо с углом, зависящим от величины остаточной индукции магнитопровода на момент включения. Предложен ряд технических решений по автоматическому измерению величины этой индукции путем интегрирования первичных напряжений, по искусственному размагничиванию магнитопровода перед отключением, косвенному измерению амплитуды индукции или тока намагничивания. На (рис. 12) приведены диаграммы работы универсального преобразователя с автоматическим выбором углов включения, когда специально нарушено правило чередования знаков полуволн тока. но и тогда трансформатор включается сразу на установившуюся индукцию. Преобразователь может работать в статорных и роторных цепях асинхронного двигателя как регулируемая индуктивность.

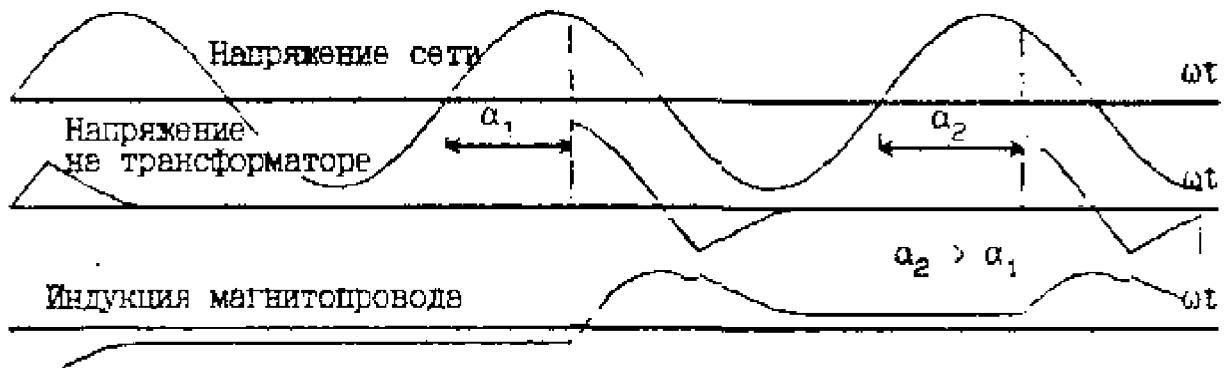


Рис.12. Диаграммы сигналов универсального преобразователя

В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ рассмотрены вопросы повышения энергетической эффективности выпрямителей. Показано, что предположение мгновенной коммутации позволяет отнести большинство известных схем выпрямления к описанному случаю НСТСН. Тогда при определении полной мощности формулой (6), произведение коэффициента мощности на КПД линейно связано с глубиной регулирования, т.е. формулой (7), но с коэффициентом. Рассмотрено два случая: а) активная нагрузка с полезным среднеквадратичным напряжением $U_{\text{пп}}$; б) ЭДС E двигателя с током, для которого известно значение коэффициента формы K_F . Тогда, например, для трехфазной мостовой схемы получены формулы для случаев (а) и (б);

$$\eta * \chi = U_{\text{пп}} / (\sqrt{2} * U_s) \rightarrow 0.9558 * U_{\text{пп}} / U_{\text{макс}}; \quad (a) \quad (10)$$

$$\eta * \chi = E / (K_F * \sqrt{2} * U_s) \rightarrow 3/\pi = 0.9549 * E / E_{\text{макс}}. \quad (b)$$

Здесь первой части формул соответствует общий случай работы выпрямителя с произвольной несимметричной системой напряжений любых форм, а второй (после стрелки) - частный случай работы с симметричной системой синусоидальных напряжений при $K_F = 1$. В знаменателях правой части стоят максимально возможные значения выхода. Для частного случая получились известные 0.9558 и 0.9549 значения коэффициентов мощности выпрямителя при работе без регулирования на активную нагрузку и ЭДС. Показано, что обратное значение коэффициентов мощности соответствует значению расчетной мощности трансформатора: а) 1.046; б) $\pi/3 = 1.047$. Предлагаемое доказательство левых частей формул (10) замечательно тем, что не потребовало диаграмм сигналов процесса выпрямления, достаточно было предположения НСТСН.

Получается, что, так же как и в главе 2, повысить коэффициент мощности можно только за счет эффекта параллельной работы нескольких нагрузок или эквивалентному такой работе режиму. В практических разработках исследованы известные схемы выпрямления с нулевыми (отличать от шунтирующих) вентилями, предложен ряд новых схем. Эффект параллельной работы приводит к появлению двух степеней свободы. Вторую традиционно используют для максимально возможного повышения коэффициента мощности. Исследована и внедрена на главные привода непрерывного нереверсивного стана схема (рис. 13). Отличительной особенностью схемы является то, что в ней не возникают свойственные известным схемам с нулевыми вентилями режимы трехфазной нулевой схемы с пульсирующим потоком вынужденного подмагничивания, недопустимого в мощных схемах.

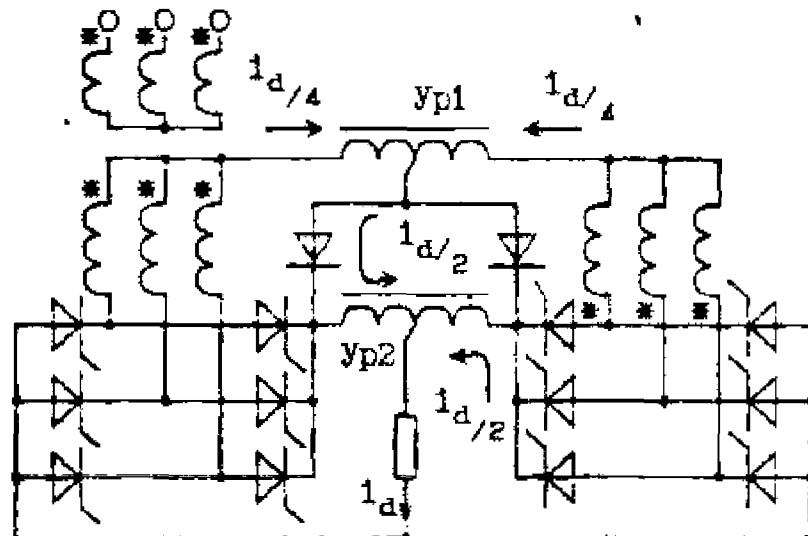


Рис.13. Схема выпрямления без подмагничивания трансформатора

В ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ предлагается решить задачу распределения ответственостей за загрузку сетевого трансформатора в виде различных форм балансов именно к КВАДРАТУ ПОЛНОЙ МОЩНОСТИ (1 в), что по отношению к первичным сигналом является балансом ЧЕТВЕРТОЙ СТЕПЕНИ, в не в виде балансов (1 S, б), что по отношению к сигналам является балансом ВТОРОЙ СТЕПЕНИ. Первая попытка постановки и решения подобной задачи для сети внутри концепции Фризе предпринята в работе Замараева В.С., Солодухо Я.Е. Обобщенные энергетические показатели систем с вентильными преобразовательными устройствами

// Современные задачи преобразовательной техники. – Киев: ИЭД АН УССР, 1975. -4.4. -C.21-26.

Балансы могут быть записаны через взаимодействия реальных токов сети и элемента (11 а) только для "сети" (рис. 2), для общего случая "сети" и "цепи" (рис. 3) в комплексной форме (11 б) и через индивидуальные интегральные величины (11 в):

$$S_{sk}^2 = U_s^2 * (I_s, I_k); \quad (a)$$

$$S_{sk}^2 = \text{Ex}\{\dot{S}_s * \dot{S}_k\}; \quad (b)$$

$$S_{sk}^2 = P_s * P_k + Q_s * Q_k + X_s * X_k + Y_s * Y_k + \dots \quad (b)$$

$$S_s^2 = U_s^2 * I_s^2 = \sum_0^N S_{sk}^2 = P_s^2 + Q_s^2 + X_s^2 + Y_s^2 + \dots \quad (12)$$

В формуле (11 б) использован более широкий оператор извлечения (Extract) вместо общепринятого оператора извлечения реальной части (Real). Появляется форма записи члена S_{sk}^2 ответственности k-го элемента цепи за квадрат полной мощности (12). В этой форме "2" понимается как верхний индекс, указывающий на размерность, а не общепринятый квадрат. Этот член может быть и отрицательным. Во всех формах (11) есть члены с левыми и правыми множителями и суммы правых по всей цепи равны левым. По крайней мере, это очевидно для случая "сети" (рис. 2) и "цепи" в форме (11 в), (1 а. б). Эта основная гипотеза поиска формы решения задачи оформлена патентом России на формы (11 в), (12). В патенте реализация формулы (11 в) дана "на примере сети". К сожалению, определить, что такое Q_k в форме (11 в) для "цепи" можно только после раскрытия комплексного варианта решения задачи (11 б), что описано ниже.

Попытки применения систем комплексных чисел, кватернионов и октав для раскрытия комплексной формы (11 б) оказались безрезультатными. За этими системами стоят известные в математике тождества **двух**

$$(U_1^2 + U_2^2) * (I_1^2 + I_2^2) = (U_1 * I_1 + U_2 * I_2)^2 + (U_1 * I_2 - U_2 * I_1)^2, \quad (13)$$

четырех

$$\begin{aligned} (U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + U_4^2) * (I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + I_4^2) &= (U_1 * I_1 + U_2 * I_2 + U_3 * I_3 + U_4 * I_4)^2 + \\ &+ (U_1 * I_2 - U_2 * I_1 + U_3 * I_4 - U_4 * I_3)^2 + (U_1 * I_3 - U_2 * I_4 - U_3 * I_1 + U_4 * I_2)^2 + \\ &+ (U_1 * I_4 + U_2 * I_3 - U_3 * I_2 - U_4 * I_1)^2 \end{aligned} \quad (14)$$

и восьми квадратов. Задача решена в общем виде после предложения нового тождества любого числа квадратов, но не по классическим правилам математики. Например, для 4-х ортов оно имеет вид

$$\begin{aligned} (U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + U_4^2) * (I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + I_4^2) &= (U_1 * I_1 + U_2 * I_2 + U_3 * I_3 + U_4 * I_4)^2 + \\ &+ (U_1 * I_2 - U_2 * I_1)^2 + (U_1 * I_3 - U_3 * I_1)^2 + (U_1 * I_4 - U_4 * I_1)^2 \quad + (15) \\ &+ (U_2 * I_3 - U_3 * I_2)^2 + (U_2 * I_4 - U_4 * I_2)^2 + (U_3 * I_4 - U_4 * I_3)^2. \end{aligned}$$

Только после этого удается реализовать запись баланса в форме (11 б, в), например, при разложении сигналов по 4-м функциональным ортам

$$\begin{aligned} S_{sk}^2 &= \text{Ex}((\dot{U}_s * \dot{I}_s) * (\dot{U}_k * \dot{I}_k)) = \quad (a) \\ &= (U_{s1} * I_{s1} + U_{s2} * I_{s2} + U_{s3} * I_{s3} + U_{s4} * I_{s4}) * (U_1 * I_1 + U_2 * I_2 + U_3 * I_3 + U_4 * I_4) + (b) \\ &\quad + (U_{s1} * I_{s2} - U_{s2} * I_{s1}) * (U_1 * I_2 - U_2 * I_1) + \quad (1-2) \\ &\quad + (U_{s1} * I_{s3} - U_{s3} * I_{s1}) * (U_1 * I_3 - U_3 * I_1) + \quad (1-3) \\ &\quad + (U_{s1} * I_{s4} - U_{s4} * I_{s1}) * (U_1 * I_4 - U_4 * I_1) + \quad (1-4) \quad (b) \quad (16) \\ &\quad + (U_{s2} * I_{s3} - U_{s3} * I_{s2}) * (U_2 * I_3 - U_3 * I_2) + \quad (2-3) \\ &\quad + (U_{s2} * I_{s4} - U_{s4} * I_{s2}) * (U_2 * I_4 - U_4 * I_2) + \quad (2-4) \\ &\quad + (U_{s3} * I_{s4} - U_{s4} * I_{s3}) * (U_3 * I_4 - U_4 * I_3) = \quad (3-4) \\ &= (u_s, 1_s) * (u_k, 1_k) + \quad (r) \\ &\quad + \text{Ex}[u_s, 1_s] * [u_k, 1_k]. \quad (d) \end{aligned}$$

Чтобы воспользоваться формулой (16), надо предварительно все сигналы цепи разложить по любому числу ортогональных функциональных ортов любым методом, минимальное число ортов дает процедура Грама–Шмидта. "но возможно разложение и по бесконечному ряду. Возможно, применение более устойчивых процедур, например, Демирчяна–Ракитского. Возможно введение функциональных ортов по желанию пользователя, дисбаланс возьмет на себя оставшиеся невязки. В формуле (16 б, в) каждый индекс соответствует своему орту. Баланс по всей цепи "всех левых сомножителей в формуле сходится к правым, то есть обеспечивается выполнение свойств формулы (11 в). Члену (16 б) соответствует форма записи (16 г) скалярной пары или член $P_s * P_k$ в формуле (11 в), членам (16 в) – форма записи (16 д) в виде векторной пары или член $Q_s * Q_k$ в формуле (11 в). Если перегруппировать члены (16 в), то получится скалярная Формула раскрытия векторной пары

$$\text{Ex}[u_s, 1_s] * [u_k, 1_k] = (u_s, u_k) (1_s, 1_k) - (u_s, 1_k) (1_s, u_k). \quad (17)$$

Под математические операции в формуле (16) создана система "комплексных размерностей", действия с ними похожи на действия с гиперкомплексными числами, но являются ли они "числами" могут ответить математики. Поэтому для них выбрано новое название. Применяемая в курсе ТОЭ система комплексных чисел построена на базе тождества двух квадратов (13). Это тождество является частным случаем и известного тождества 4-х квадратов под кватернионы (14), и частным случаем предложенного (15). В формулах (16), (17) принято обозначение $\text{Ex}\{\}$ (Extract) вместо $\text{Re}\{\}$ для комплексных чисел. В дальнейшем оператор Ex опущен. Из формул (16), (17) получается интегральная формула балансируемой ответственности k -го элемента цепи

$$\begin{aligned} S_{sk}^2 &= (u_s, u_k) * (i_s, i_k) - (u_s, i_k) * (u_k, i_s) + (u_s, i_s) * (u_k, i_k) = (a) \\ &= (u_s, i_s) * (u_k, i_k) + [u_s, i_s] * [u_k, i_k] = P_s * P_k + Q_s * Q_k. \quad (b) \end{aligned} \quad (18)$$

Эта формула опубликована в 1989 г. для частного случая двухортной цепи (все сигналы могут быть разложены по двум ортам) через комплексные числа, а после предложения тождества квадратов (15) подтверждена для общего случая. Приведены численные примеры балансов по всем вариантам записи одной формулы.

В формулах (11 в), (16), (18) пассивные члены и векторные произведения $[x,y]$ встречаются только парами. Это должно со временем закрыть дискуссии о "знаке реактивной мощности", знаке векторного произведения, так как исчезает практическая потребность в решении этой проблемы. Знак же ответственности определяется знаком векторной пары и формируется объективно.

Модельная технология создания измерительных устройств под разрабатываемые формулы показала, что предложенный баланс сводится к линейному балансу эквивалентных каждой энергетической составляющей температур в сетевом трансформаторе. Значит, уже возможны измерения в любых режимах, хотя формулами описать это сложно. Приведены варианты несложных схем измерений как общей ответственности элемента цепи, так и ее составляющих по выбору пользователя.

Для иллюстрации выбрана схема (рис. 14) с диаграммами сигналов (рис. 15) в безразмерных единицах. Эти сигналы разложены по четырем функциональным ортам простейшим для человека способом. Графики

(рис. 15) разбита на четыре непересекающиеся прямоугольника со значениями длительностей $0.64 + 0.16 + 0.16 + 0.04 = 1$. Из этих значений получаются простые корни квадратные 0.8, 0.4, 0.2. Например, сигнал U_S представлен суммой всех четырех прямоугольников с одинаковой амплитудой 6, а действующие значения этих прямоугольников составят $U_{S1} = 6 * 0.8 + 0 * 0.4 + 0 * 0.4 + 0 * 0.2 = 4.8$; $U_{S2} = 0 * 0.8 + 6 * 0.4 + 0 * 0.4 + 0 * 0.2 = 2.4$ И т.д. Так заполнена таблица 1 ортогональных составляющих всех сигналов (рис. 15). Результаты расчетов по формулам (16), (18 а) сведены в таблицы 2, 3.

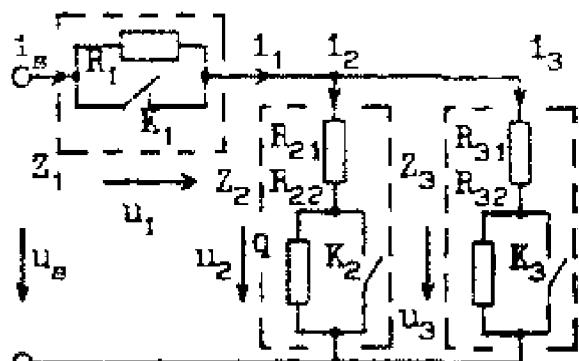


Рис.14. Пример цепи

ортогональные
составляющие сигналов. Табл.1.

ЭЛ-НТ	1	2	3	Сеть
u	3.2	1.6	1.6	4.8
	0	2.4	2.4	2.4
	0	2.4	2.4	2.4
	0	1.2	1.2	1.2
1	3.2	2.4	0.8	3.2
	4.8	3.6	1.2	4.8
	2.4	1.2	1.2	2.4
	1.8	0.6	1.2	1.8

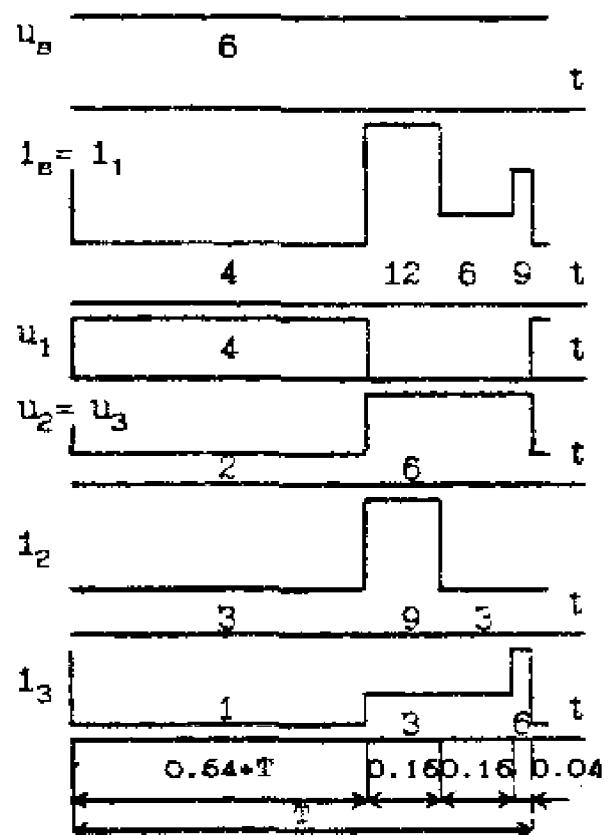


Рис.15. Сигналы в цепи

Среднеквадратичное значение сетевого тока проще определить по данным таблицы 1: $I^2_S = 3.2^2 + 4.8^2 + 2.4^2 + 1.8^2 = 42.28$. Средне квадратичное значение напряжения сети $U^2_S = 6^2 = 36$. Квадрат полной мощности сети $S^2_S = 36 * 42.28 = 1522.1$. К этому значению сходятся балансы элементных ответственостей и их составляющих в таблицах 1, 2.

Расчеты по формуле (18 а)

Таблица 2

Функция	Элемент 1	Элемент 2	Элемент 3	Сеть
$+(u_s, u)(1_s, 1)$	649.42	596.91	275.75	1522.1
$-(u_s, 1)(u, 1_s)$	-356.35	-583.55	-271.14	-1211.04
$+(u, 1)(u_s, 1_s)$	356.35	559.58	295.1	1211.04
S_{sk}^2	649.42	572.95	299.71	1522.1

Расчеты по формуле (16)

Таблица 3

Функция	Элемент 1	Элемент 2	Элемент 3	Сеть
$(u, 1)$	10.24	16.08	8.48	34.8
$[u, 1] (1-2)$	15.36	0	0	15.36
$(1-3)$	7.68	-3.84	0	3.84
$(1-4)$	5.76	-1.92	0.96	4.8
$(2-3)$	0	-5.76	0	-5.76
$(2-4)$	0	-2.88	1.44	-1.44
$(3-4)$	0	0	1.44	1.44
$(u, 1)(u_s, 1_s)$	356.35	559.58	295.1	1211.04
$[u, 1][u_s, 1_s]$				
$(1-2)$	235.93	0	0	235.93
$(1-3)$	29.49	-14.75	0	14.75
$(1-4)$	27.65	-9.22	4.61	23.04
$(2-3)$	0	33.18	0	33.18
$(2-4)$	0	4.14	-2.07	2.07
$(3-4)$	0	0	2.07	2.07
Итого	293.07	13.36	4.61	311.04
Сумма	649.42	572.95	299.71	1522.1

Формула (16 в) дает любой набор пассивных составляющих полной мощности по желанию исследователя, которому остается только выбрать свой функциональный базис ортогонального разложения сигналов. Двучленная формула (18 б) просто определяет сразу произведение $Q_s * Q_k$, но остается открытым вопрос "реактивной мощности нелинейного элемента", то есть значения Q_k . Предложенное в диссертации решение делает этот вопрос неактуальным, но позволяет формально ответить на него двумя интегральными формулами:

$$Q_s = \sqrt{U_s^2 * I_s^2 - P_s^2}. \quad (a)$$

$$Q_k = \frac{(u_s, u_k)(1_s, 1_k) - (u_s, 1_k)(u_k, 1_s)}{\sqrt{U_s^2 * I_s^2 - P_s^2}}. \quad (b) \quad (19)$$

Формула (19 а) интересна тем, что предложена очень давно и многими авторами, включая Фризе. Но теперь формула идет в паре с (19 б), и эта пара впервые стала балансируемой по всей цепи.

В ПЯТОЙ ГЛАВЕ решается задача распределения ответственостей за загрузку трехфазного сетевого трансформатора по элементам произвольной цепи. Предложен прием приведения элемента цепи к входу ее питания гипотетическим трансформатором. Это позволяет затем воспользоваться более простой формулой (11 в). Сначала этот прием проверен на однофазной цепи (рис. 3). В результате получен второй вариант записи формулы (18) через взаимодействия одноименных сигналов

$$S_{\text{ак}}^2 = (u_a \cdot u_k) * (i_a \cdot i_k) + [u_a \cdot u_k] * [i_a \cdot i_k]. \quad (20)$$

Эта форма интересна тем, что в ней нет взаимодействий разноименных сигналов (мощностей), что открывает второй взгляд на энергопроцессы в цепях.

Этот прием "трансформаторных преобразований" перенесен на трехфазные цепи для приведения внутреннего элемента цепи к сетевым зажимам (рис. 4), т.е. к случаю "сети". Из рисунка видно, что при этом у элемента появляется сбоку (в пространстве) вывод z без тока, но с потенциалом. Из формулы полной мощности (6) видно, что в квадратуре находятся сигналы разных фаз независимо от их форм. В трехфазных цепях мы имеем дело с двумя типами ортогональностей: временной и пространственной. Теперь и у любого двухполюсника внутри цепи сбоку появляется пространственный "хвост" z (рис. 4). Только после этого удалось получить сложную формулу трехфазного баланса через взаимодействия одноименных сигналов. Аналогичные действия приведения трансформаторами тока привели к другой формуле. Так были получены два частных решения. Общее решение найдено в виде линейной комбинации частных с долевыми коэффициентами D_U и D_i ($D_U + D_i = 1$). Предложен вариант формул для этих коэффициентов (22). В результате получено несколько форм записи формулы трехфазного энергетического баланса ответственостей за квадрат полной мощности. Вот один из них в форме (20) с напряженческими U_z (рис. 4) и тоновыми i_z хвостами элементных сигналов

$$\begin{aligned}
S_{sk}^2 = & (u_A \cdot u_k)(i_A \cdot i_k) + [u_A \cdot u_k][i_A \cdot i_k] + \\
& +(u_B \cdot u_k)(i_B \cdot i_k) + [u_B \cdot u_k][i_B \cdot i_k] + \quad (a) (21) \\
& +(u_C \cdot u_k)(i_C \cdot i_k) + [u_C \cdot u_k][i_C \cdot i_k] + \\
& + D_u * \{ -(u_{BC} \cdot u_z)(i_A \cdot i_k) + [u_{BC} \cdot u_z][i_A \cdot i_k] - \\
& - (u_{CA} \cdot u_z)(i_B \cdot i_k) + [u_{CA} \cdot u_z][i_B \cdot i_k] - \\
& - (u_{AB} \cdot u_z)(i_C \cdot i_k) + [u_{AB} \cdot u_z][i_C \cdot i_k] \} + \\
& + D_i * \{ +(u_{BC} \cdot u_k)(i_A \cdot i_z) - [u_{BC} \cdot u_k][i_A \cdot i_z] - \quad (b) \\
& + (u_{CA} \cdot u_k)(i_B \cdot i_z) - [u_{CA} \cdot u_k][i_B \cdot i_z] - \\
& + (u_{AB} \cdot u_k)(i_C \cdot i_z) - [u_{AB} \cdot u_k][i_C \cdot i_z] \}.
\end{aligned}$$

Здесь $U_s^4 = U_s^2 * U_s^2$; $I_s^4 = I_s^2 * I_s^2$; $I_s^2 = I_A^2 + I_B^2 + I_C^2$;

$$D_u = \frac{\frac{[u_x \cdot u_y]^2}{U_s^4}}{\frac{[u_x \cdot u_y]^2}{U_s^4} + \frac{[i_x \cdot i_y]^2}{I_s^4}}; \quad D_i = \frac{\frac{[i_x \cdot i_y]^2}{I_s^4}}{\frac{[u_x \cdot u_y]^2}{U_s^4} + \frac{[i_x \cdot i_y]^2}{I_s^4}}. \quad (22)$$

$$u_z = \frac{1}{3 * [u_A \cdot u_B]} * \{ [u_A \cdot u_k] * u_A + [u_B \cdot u_k] * u_B + [u_C \cdot u_k] * u_C \}; \quad (a) (23)$$

$$i_z = \frac{1}{3 * [i_A \cdot i_B]} * \{ [i_A \cdot i_k] * i_A + [i_B \cdot i_k] * i_B + [i_C \cdot i_k] * i_C \}. \quad (b)$$

Операция векторного деления $[] / []$ преобразуется в скалярные произведения умножением числителя на знаменатель и применением формулы (17).

Формула баланса через более привычные взаимодействия разноименных сигналов (мощности) типа (16 г, д) получена алгебраическими преобразованиями. При этом в итоговом балансе вида (11 в), (12) третий член получился с минусом ($-X_s * X_k$ и $-X_s^2$). Такой баланс называется гиперболическим, а обычный с положительными квадратичными членами – тригонометрическим. Надо или принимать гиперболический баланс, или менять формулу полной мощности (6). Вариант баланса под другую формулу полной мощности предложен в учебном пособии и не включен в диссертацию.

Приведены варианты анализа обоих форм записи конечных формул на конкретных цепях, получены сходимости всех вариантов балансов элементных ответственостей и их составляющих по аналогии с

таблицами 2. 3. По крайней мере, можно сделать вывод, что принятая методика решения поставленной задачи НИГДЕ НЕ ЗАШЛА В ТУПИК и может быть применена при других исходных данных, т.е. при другой формуле полной мощности (6).

Представляют практический интерес частные случаи общего решения задачи. Так, в реальных системах электроснабжения присутствуют почти синусоидальные несимметричные сигналы. С точки зрения предлагаемого такие цепи относятся к двухортным. Тогда формула (21) преобразуется к виду

$$S_{\text{ак}}^2 = \frac{1}{\frac{[i_A \cdot i_B]^2}{I_s^4} + \frac{[u_A \cdot u_B]^2}{U_s^4}} * \\ * \left[(u_A \cdot u_k)(i_A \cdot i_k) * \left[1 - \frac{U_A^2}{U_s^2} - \frac{i_A^2}{I_s^2} \right] + \right. \\ \left. + (u_B \cdot u_k)(i_B \cdot i_k) * \left[1 - \frac{U_B^2}{U_s^2} - \frac{i_B^2}{I_s^2} \right] + \right. \\ \left. + (u_C \cdot u_k)(i_C \cdot i_k) * \left[1 - \frac{U_C^2}{U_s^2} - \frac{i_C^2}{I_s^2} \right] \right]. \quad (24)$$

При полной симметрии двухортной цепи по входным сигналам электропитания формула еще упрощается

$$S_{\text{ак}}^2 = 2 * \{(u_A \cdot u_k)(i_A \cdot i_k) + (u_B \cdot u_k)(i_B \cdot i_k) + (u_C \cdot u_k)(i_C \cdot i_k)\}. \quad (25)$$

Интересно, что баланс для квадрата полной мощности сети выразился через взаимодействия одноименных сигналов, в нем нет мощностей, т.е. взаимодействий разноименных сигналов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена важная научно-техническая проблема повышения энергетической и технологической эффективности комплексов с вентильными преобразователями (преимущественно с ИМ-НЧ регулированием переменного напряжения электропечей сопротивления) путем синтеза законов управления преобразователями на основе предложенных оценок этих эффективностей, найденных закономерностей их изменения при регулировании, а также предложенных

формул распределения (балансов) ответственостей за неэффективное потребление электроэнергии этими преобразователями. При внедрении предложенных законов управления решены побочные проблемы, связанные с устранениями потоков намагничивания и вынужденного подмагничивания преобразовательных трансформаторов.

Основные научные результаты, выводы и рекомендации

1. Оптимизационная задача Фризе разложения периодического тока однофазного электроприемника на две ортогональные составляющие обобщена на трехфазные электроприемники и на непериодические сигналы. Показана возможность расширения круга выделяемых ортогональных составляющих. Решена зеркальная оптимизационная задача определения квадрата полной мощности однофазного и трехфазного электроприемника ПО ПРОЦЕССАМ В ТРАНСФОРМАТОРЕ, к которому он подключен, а не по процессам в электроприемнике. Решение этих задач позволяет энергетически обосновать законы оптимального управления компенсаторами, компенсированными и компенсирующими преобразователями и их группами.

2. Доказано, что при любых способах управления произведение коэффициента мощности на КПД для одно- и трехфазных преобразователей с непосредственной связью токов сети и нагрузки (НСТСН) линейно зависит от глубины регулирования и не зависит от формы напряжений питающей сети и законов управления преобразователем.

3. Получены расчетные соотношения повышения энергетических показателей за счет эффекта взаимокомпенсации при явной или неявной параллельной работы электроприемников для

а) идеального переключателя отпаек трансформатора при активной нагрузке, произвольном напряжении сети и произвольном законе переключении отпаек;

б) независимой (несинхронизированной) работы преобразователей переменного напряжения с произвольным потребителем;

в) синхронизированной работы преобразователей переменного напряжения с ИМ-НЧ.

4. Предложена схема выпрямления, в которой используется эффект неявной параллельной работы мостовой схемы и схемы две обратные звезды с уравнительным реактором. В схеме не создается пульсирующий поток вынужденного подмагничивания, характерный для известных схем с

нулевыми вентилями, что делало невозможным их применение при больших мощностях.

5. Предложено оценивать технологическую эффективность регулирования напряжения теплового объекта величиной колебаний температуры в его упрощенной модели. Найдены предельные способы ИЫ-НЧ модуляции релейной обратной связью и частотно-импульсными методами, уступающие фазовому регулированию только в 3...6 раз по этому показателю и не имеющие дискретности регулировочной характеристики, характерной для известных способов ШИМ-НЧ.

6. Показано, что введение релейной системы в режим вынужденных колебаний является самым простым способом ортогонального управления преобразователем с ИМ-НЧ по двум степеням свободы (технологической и энергетической) и способом взаимной синхронизации преобразователей между собой или с произвольным потребителем. Предложены варианта подобной синхронизации:

- а) поочередно последовательная синхронизация;
- б) через последовательная синхронизация;
- в) резидентное управление группой от центральной ЭВМ, которая в принципе не может нарушить технологический процесс.

7. Обеспечено включение печеного трансформатора сразу на установившийся ток намагничивания при любом сочетании ИМ-НЧ и фазового регулирований, при изменениях параметров нагрузки.

8. Показано, что КВАДРАТ ПОЛНОЙ МОЩНОСТИ источника питания определяется через сумму комплексных произведений полной мощности сета на мощности элементов цепи (через сумму элементных ответственостей). Для получения комплексных произведений предложено тождество любого числа квадратов и соответствующая ему система "комплексных размерностей", близкая по своей сути к гиперкомплексным числам. Получены все формы записи (интегральная, спектральная, через отдельные составляющие, включая реактивную составляющую, и т.д.) этой формулы.

9. Показано, что все полученные формулы балансов можно также получить путем взаимного приведения сигналов элемента и источника питания с помощью гипотетических трансформаторов. Такой подход позволил получить формулы балансов элементных ответственостей за

квадрат полной мощности при трехфазном трехпроводном источнике питания.

10. На предельно упрощенных моделях исследуемых явлений показано, что предложенный относительный четвертичный по размерности баланс сводится к линейному балансу эквивалентных каждой энергетической составляющей температур в сетевом трансформаторе в любых режимах, что приводит к потерям энергии и старению изоляции трансформатора. Моделированием синтезированы схемы выделения (измерения) различных энергетических составляющих, связанных с процессами нагрева и преждевременного износа трансформатора в любых режимах.

11. Основные предложения диссертации защищены ав юрскими свидетельствами. Разработанные преобразователи работают на заводах Урала. Научные результаты использованы при подготовке специалистов по электротехническим специальностям энергетического факультета Южно-Уральского государственного университета.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В 120 ПЕЧАТНЫХ РАБОТАХ, В ТОМ ЧИСЛЕ:

а) монографии и учебные пособия:

1. Гельман М.В., Лохов С.П. Тиристорные регуляторы переменного напряжения, -М.: Энергия, 1975. -104 с.
2. Лохов С.П. Энергетические составляющие мощности вентильных преобразователей. Однофазные цепи: Учеб. пособие. -Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 1999. - 4.1. -106 с.
3. Лохов С.П. Энергетические составляющие мощности вентильных преобразователей. Многофазные цепи: Учеб. пособие. - Челябинск: ИЗД. ЮУрГУ. 1999. - 4.2. -123 с.

б) статьи:

4. Гельман М.В., Лохов С.П. Сравнение импульсного и фазового способов регулирование переменного напряжения// Электротехническая промышленность. Преобразовательная техника. -1971. -Вып.14. -;13-16.
5. Гельман М.В., Хителев Е.И., Лохов С.П., Рыжков А.Н. Трехфазный импульсный регулятор для электропечи сопротивления //

Электротехническая промышленность. Электротермия. -1971. -Вып.107. - С.11-13.

6. Гельман М.В., Лохов С.П. Регулирование коэффициента мощности с помощью широтно-импульсных регуляторов // Электротехническая промышленность. Преобразовательная техника. -1975. -Вып. 6(65). -С.13-16.

7. Гельман М.В., Колкер М.И., Лохов С.П., Полищук Я.А., Боос В.Я., Федин В.Н. Работа тиристорного контактора на нагрузку, включенную через трансформатор // Электротехническая промышленность. Электротермия. -1976. -Вып.4(164). -С.10-12.

8. Гельман М.В., Лохов С.П., Табашников А.И., Григорьев В.С., Добычин В.К., Растворгув Н.П., Савицкий С.К., Флейшман Л.С. Опыт эксплуатации тиристорных преобразователей с повышенным коэффициентом мощности // Промышленная энергетика. -1984. -5. -С.15-17.

9. Лохов С.П. Колебания регулируемой величины при различных способах регулирования переменного напряжения // Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентильных преобразователей: Сборник научных трудов 108. –Челябинск: ЧПИ, 1972. -С.98-104.

10. Лохов С.П. Особенности релейного регулирования переменного напряжения // Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентильных преобразователей. Сборник научных Трудов 124. -Челябинск: ЧПИ, 1973. -С.128-134.

11. Лохов С.П., Гельман М.В. Повышение качества электроэнергии в автономных системах управляемой компенсацией отклонений тока от энергетически оптимальной формы // Вопросы управления в автономных электроэнергетических системах. Труды семинара "Кибернетика электроэнергетических систем". Труды ЧПИ 1Б7. -Челябинск: ЧПИ, 1975. - ВЫП.1. -С.274-279.

12. Лохов С.П., Гельман М.В., Боос В.Я. Методы управления тиристорными ключами на первичной стороне многофазного трансформатора в регуляторах переменного напряжения// Современные задачи преобразовательной техники. -Киев: ИЭД АН УССР, 1975. -4.2. - С.306-309.

13 Лохов С.П. О разложении несимметричного несинусоидального изменяющегося тока на составляющие и определении понятия "коэффициент мощности" // Современные задачи преобразовательной техники. -Киев: ИЭД АН УССР. 1975. -4.5. -C.270-275.

14 Лохов С.П., Гельман М.В., Месеняшин Г.С. Управляемый выпрямитель с естественной коммутацией и повышенным коэффициентом мощности// Известия вузов. Энергетика. -1976. - 12. -C.111-115.

15 Лохов С.П. К расчету энергетических показателей тиристорных преобразователей // Проблемы преобразовательной техники. -Киев: АН УССР. 1979. -4.2. -C.87-90.

16 Лохов С.П., Гельман М.В., Григорьев В.С., Добычин В.К, Савицкий С.Н., Растворгув Н.П. Исследование и опыт эксплуатации группы мощных тиристорных преобразователей с улучшенными энергетическими показателями // Проблемы электромагнитной совместимости силовых полупроводниковых преобразователей. -Таллин: АН ЭССР, 1982. -C.143-144.

17 Лохов С.П., Файла Л.Ф. Исследование квазистатического режима работы системы синхронизации группы импульсных преобразователей методом точечный отображений// Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентильных преобразователей. Сборник научных трудов. 270. -Челябинск: ЧПИ, 1982. -C.85-91.

18 Лохов С.П. О возможности применения вентильных преобразователей в комплексе мер по выравниванию графиков нагрузки // Проблемы преобразовательной техники. -Киев: АН УССР. 1983. -4.3. -C.80-63.

19 Лохов С.П., Файла Л.Ф. Система поочередно-последовательной синхронизации импульсных преобразователей переменного напряжения // Электротехническая промышленность. Преобразовательная техника. -1984. -Вып.11 (169). -C.7-9

20. Лохов С.П., Иоффе В.С., Файда Л.Ф. Однофазный тиристорный стабилизированный преобразователь переменного напряжения для электропечей сопротивления // Электротехническая промышленность. Электротермия. -1984. -Вып.12 (262). -C.10-12.

21. Лохов С.П. Некоторые основы экономической теории энергетических показателей // Исследование автоматизированных

электроприводов электрических машин и вентильных преобразователей. Тематический сборник научных трудов. -Челябинск: ЧПИ, 1985. – С.125-134.

22. Лохов С.П. Основы теории относительных симметричных энергетических показателей // Проблемы электромагнитной совместимости силовых полупроводниковых преобразователей. Тезисы докладов Третьего Всесоюзного научно-технического совещания. -Таллин: АН ЭССР, 1986. -4.1. -С.160-161.

23. Лохов С.П. Интегральные энергетические показатели сложных электрических систем // Первая Всесоюзная конференция по теоретической электротехнике. Секция 1, 2. Ташкент: АН СССР, 1987. – С.18-19.

24. Лохов С.П. Энергетические составляющие в сетях с вентильными преобразователями// Силовая полупроводниковая техника и ее применение в народном хозяйстве (Тезисы докладов). -Челябинск: ЧПИ, 1989. – С.155-156.

25. Лохов С.П. Относительные балансируемые энергетические составляющие полной мощности нелинейных электрических цепей и их измерение // Силовая электроника и решение проблем ресурс- и энергосбережения. -Харьков: ХПИ, 1993. -С.340-344.

26. Лохов С.П. Относительные балансируемые энергетические составляющие полной мощности однофазной сети // Электротехнические системы и комплексы. -Магнитогорск: Издание МГМА. 1996. -Выд.2. - С.82-87.

27. Лохов С.П. Относительные балансируемые энергетические составляющие полной мощности трехфазной сети. -Там же. -С.88-93.

в) авторские свидетельства:

28. А.с. 425173. Способ управления широтно-импульсным регулятором переменного напряжения/ Гельман М.В., Лохов С.П. -Заявл. 03.12.69. Опубл. в бюлл., 1974, N15.

29. А. с. 350110. Релейно-фазовый регулятор переменного напряжения/ Гельман М.В., Лохов С.П. -Заявл. 02.04.70. Опубл.в бюлл., 1972. N26.

30. А. с. 377752. Способ управления группой импульсных регуляторов/ Гельман Н.В., Лохов С.П., Рыжков А.Н. - Заявл. 13.04.70. Опубл. в бюлл., 1973, К18.
31. А.с. 395826. Способ синхронизированного управления широтно-импульсным регулятором / Гельман І.В., Лохов С.П., Рыжков А.Н. -Заявл. 25.01.71. Опубл. в бюлл., 1973, N35.
32. А. с. 403006. Способ управления тиристорным регулятором / Гельман М.В., Лохов С.П. -Заявл. 17.05.71. Опубл. в бюлл., 1973, N42.
33. А.с. 705354. Способ измерения пассивной составляющей тока / Лохов С.П. -Заявл. 10.03.72. Опубл. в бюлл., 1979, N47.
34. А.с. 557460. многофазный управляемый выпрямитель / Гельман М .В., Лохов С.П., Голубцов В.Л., Фишлер Я.Л., Флейшман Л.С. -Заявл. 24.04.72. Опубл. в бюлл., 1977, К17.
35. А.с. 556550. Способ управления вентильным преобразователем / Гельман Н.В., Лохов С.П., Рыжков А.Н. -Заявл. 27.04.72. Опубл. в бюлл., 1977, N16.
36. А.с. 756591. Способ управления преобразователем/ Лохов С.П. - Заявл. 23.11.73. Опубл.в бюлл., 1980, ИЗО.
37. А. с. 692054. Способ управления тиристорным регулятором переменного напряжения и устройство для его осуществления/ Лохов С.П., Гельман М.В., Боос В.Я. -Заявл. 04.01.76. Опубл. в бюлл., 1976, N38.
38. А.с. 588613. Система управления группой импульсных регуляторов/ Лохов С.П., Боос В.Я., Гельман М.В., Евсеев Б.А., Рыжков А.Н. -Заявл. 16.04.76. Опубл. в бюлл., 1978, N2.
39. А. с. 935897. Регулятор переменного напряжения/ Лохов С.П. - Заявл. 09.01.80. Опубл. в бюлл., 1982. К22.
40. А. с. 1020958. Способ управления группой импульсных преобразователей/ Лохов С.П. -Заявл. 29.07.81. Опубл. в бюлл., 1983, N20.
41. А.с. 1146774. Преобразователь переменного напряжения в постоянное/ Лохов С.П., Флейшман Л.С., Мурзицков В.Н., Давшков И.К. - Заявл. 14.01.82. Опубл. в бюлл., 1985. Nil.
42. А.с. 1138900. Устройство для управления регулятором переменного напряжения/ Лохов С.П., Верба И.В., Иоффе В.С., Резников В.И., Смердов Г.А. -Заявл. 22.02.83. Опубл. в бюлл., 1985. В5.

43. А.с. 1284443. Способ управления группой импульсных преобразователей/ Лохов С.П. -Заявл. 27.09.83. Опубл. в бюлл., 1997, N34.

44. А.с. 1335886. Способ измерения пассивного тока электроприемника и его составляющих/ Лохов С.П. - Заявл. 12.08.85. Опубл. в билл., 1987. N33.

45. Патент России 1552111. Способ определения величины потерь в сети электроснабжения/ Лохов С.П. -Заявл. 18.05.88. Опубл. в бюлл., 1990, H11.

46. А.с. 1667209. Способ импульсно-фазового управления однофазным тиристорным регулятором с трансформаторной нагрузкой/ Лохов С.П. -Заявл. 16.08.88. Опубл. в бюлл., 1991, N28.



Издательство Южно-Уральского государственного
университета

ИД N 00200 от 29.09.90. Подписано в печать 19.04.2000. Формат
60*84 1/16. Печать офсетная. Усл. печ. л. 2,09. Уч.-изд. л.2.
Тираж 90 экз. Заказ 185/178.

УОТ издательства. 454080. г.Челябинск, пр. им. В.И.Ленина, 76.