

На правах рукописи

Астапович Юрий Михайлович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ
СИСТЕМАМИ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ НА ОСНОВЕ
ГРУППОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Саратов – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Митяшин Никита Петрович

Официальные оппоненты: Львов Алексей Арленович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», профессор кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации»

Погодин Николай Васильевич, кандидат технических наук, ООО МПП «Энерготехника», г. Саратов, главный инженер

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарёва», г. Саранск

Защита состоится «25» декабря 2013 г. в 13.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.242.10 при ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.» по адресу: 410054, Саратов, ул. Политехническая, 77, корпус 1, ауд. 319.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.».

Автореферат разослан «22 » ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Томашевский Ю.Б.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Для ряда технологических процессов требуются источники питания нагрузки, изменяющиеся в широких пределах. В частности, имеются в виду преобразователи с переменным выходным напряжением нестандартной частоты, а также регулируемые выпрямители. При этом на одном предприятии могут быть иметься нагрузки широкой гаммы мощности, что требует наличия источников соответствующей мощности. В этих условиях полезными оказываются групповые преобразователи (ГП), образованные объединением выходных полюсов нескольких преобразовательных модулей ограниченного мощностного ряда.

Такой подход к организации электропитания позволяет получить и другие преимущества: повышение живучести системы, удешевление резервирования, получение возможности в реальном масштабе времени изменять мощность работающего оборудования с целью адаптации к величине и характеру нагрузки, повышение гибкости системы электроснабжения предприятия в целом.

Перспективным также являются использование ГП при организации электроснабжения на основе нескольких возобновляемых источников энергии. В таких системах особенно важными являются возможность объединения по выходу преобразовательных модулей разной мощности, а также обеспечение гибкости за счет изменения модульного состава. В такой постановке задачи, решаемые ГП, близки проблематике параллельной работы преобразователей частоты.

Решению проблемы обеспечения параллельной работы преобразователей и отдельных модулей посвящены работы многих исследователей, в том числе В.А. Чванова, Г.Г. Адамия, И.И. Артюхова, Е.И. Берковича, С.А. Харитоновна, Н.И. Бородина, А.С. Васильева, Ю.М. Голембиовского, И.И. Кантера, В.П. Климова и др. При этом предлагаемые теоретические и технические решения в основном касаются статических режимов работы групповых преобразователей, построенных на основе модулей одинаковой мощности, в связи с чем решается задача их равномерной загрузки.

Из сказанного можно сделать вывод об актуальности исследований, направленных на исследование и совершенствование ГП с заданным распределением нагрузки между модулями, закономерностей их работы в динамических режимах, вызванных изменением величины и характера нагрузки, напряжения сети и модульного состава самого преобразователя.

Цель работы: повышение эффективности управления системами электропитания на основе групповых преобразователей постоянного и переменного модульного состава.

Под повышением эффективности управления ГП понимается расширение области устойчивости системы автоматического распределения мощности между модулями в пространстве ее параметров, обеспечение высокого качества переходных процессов и требуемых значений показателей качества энергии на выходе преобразователя в широком диапазоне изменения нагрузки.

Для достижения поставленной цели в диссертации **решаются следующие задачи:**

1. Уточнение и усовершенствование способов заданного автоматического распределения нагрузки между объединенными по выходу преобразователями.

2. Разработка аналитических и компьютерных моделей систем заданного автоматического распределения нагрузки между модулями групповых преобразователей.

3. Исследование компьютерных моделей автоматических систем распределения нагрузки с целью установления зависимостей показателей качества переходных процессов от параметров силовой схемы группового преобразователя, нагрузки и коэффициентов усиления регуляторов.

4. Разработка и исследование математической модели группового преобразователя с модульным составом, управляемым в функции от мощности нагрузки, разработка алгоритмов управления его структурой.

Объектом исследования являются групповые преобразователи, понимаемые как совокупность силовых модулей, объединенных по выходу и работающих на общую нагрузку, изменяющуюся в широких пределах.

Предметом исследования являются способы и схемы, обеспечивающие заданное распределение мощности нагрузки между активными модулями преобразователя, характеристики динамики системы распределения (устойчивость, показатели качества переходного процесса).

Методы исследования включают методы теории электрических цепей, преобразовательной техники, теории автоматического регулирования, а также методы математического моделирования, аппарат функций от матриц, численные методы нахождения собственных значений матриц, элементы нечеткой математики и теории графов.

Достоверность полученных в работе результатов обеспечивается корректным применением методов аналитического решения дифференциальных уравнений, корневого метода анализа систем автоматического регулирования, обоснованностью принятых допущений, теория построена на известных проверяемых данных и согласуется с опубликованными данными других исследователей по теме диссертации, в частности, перечисленных выше.

Научная новизна работы:

1. Предложена структурная схема автоматической системы заданного распределения нагрузки между модулями ГП, отличающаяся от

известной способом получения информации о величине токов, потребляемых инверторными модулями. Ее реализация обеспечивает устойчивую работу системы в расширенных диапазонах коэффициентов регуляторов.

2. Разработанные аналитические модели автоматических систем распределения нагрузки для ГП на основе импульсных преобразователей постоянного тока (ИППТ) и автономных инверторов тока (АИТ), а также групповых компонок управляемых выпрямителей (УВ) позволяют установить зависимость показателей качества переходных процессов от параметров силовой схемы и системы распределения.

3. На основании найденной зависимости области устойчивости работы ГП на основе УВ от углов регулирования и напряжения питающей сети предложено использование в цепи обратной связи системы нелинейного адаптивного регулятора, обеспечивающего устойчивость системы распределения в заданной области пространства ее параметров.

4. Предложен вариант системы управления структурой группового преобразователя, позволяющий в реальном масштабе времени обеспечить требуемую степень соответствия между мощностью текущим значением мощности нагрузки и мощностью активной компоновки преобразователя.

Практическая ценность и реализация результатов работы

1. Предложена новая схема получения информации о текущих значениях токов, потребляемых модулями, обеспечивающая расширение области устойчивости системы распределения мощности.

2. Построена передаточная функция двухмодульного группового преобразователя, использование которой позволяет применять методы теории автоматического регулирования для синтеза систем распределения.

3. Разработан адаптивный регулятор, позволяющий расширить область устойчивости системы распределения мощности между УВ.

4. Разработаны алгоритмы управления структурой группового преобразователя с изменяемым модульным составом, применение которых обеспечивает адаптацию мощности источника к изменяющейся в широких пределах мощности нагрузки.

Результаты диссертации используются:

– в учебном процессе кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. при чтении курса лекций «Силовая электроника»;

– в учебном процессе кафедры «Системотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. при чтении курсов лекций «Основы теории управления» и «Методы оптимизации».

-

Научные результаты, выносимые на защиту:

1. Предложенная структурная схема системы автоматического распределения между модулями ГП в заданной пропорции, отличающаяся от ранее известной конфигурацией цепей обратных связей, позволяет расширить область устойчивости системы в пространстве ее параметров.

2. Предложенные аналитические модели систем распределения нагрузки на основе ИППТ, АИТ, а также групповых компоновок УВ позволяют установить зависимости показателей качества переходных процессов от параметров силовых схем модулей и системы распределения.

3. Применение нелинейного адаптивного регулятора в системе распределения нагрузки между объединенными по выходу УВ обеспечивает устойчивую работу ГП в заданных диапазонах углов управления и напряжения сети.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Всероссийской научной конференции «Актуальные задачи управления социально-экономическими и техническими системами» (Саратов, 2008), VI Международной научно-практической конференции «Логистика и экономика ресурсоэнергосбережения в промышленности» (Саратов, 11-13 декабря 2012 г.), XXVI Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях» (ММТТ-26) (Н. Новгород, НГТУ, 27-30 мая 2013 г.), 3-й Сибирской школе молодых учёных по применению математических методов и информационных технологий в рамках XXVI Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях» (ММТТ-26) (Ангарск, 10-13 сентября 2013 г.), III Международной научной конференции «Проблемы управления, обработки и передачи информации (АТМ-2013)», (Саратов, 23-26 сентября 2013 г.).

Публикации. По результатам диссертационной работы опубликовано 11 печатных работ, из них 4 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 93 наименования, содержит 131 страницу основного текста, 54 рисунка, 7 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **первой главе** определяется область исследований, анализируется состояние проблемы, формируются и обновляются основные задачи исследования.

Анализируется известная схема заданного автоматического распределения изменяющейся во времени нагрузки между преобразовательными модулями различной мощности, а также ее модификации (рис. 1).

Здесь инверторы 4 объединены по выходу и работают на общую нагрузку. Они получают питания от регулируемых выпрямителей 1 через LC -фильтры 3. Токи, потребляемые инверторами I_{di} , измеряются датчиками 5, и их значения подаются на входы сумматора 6 и устройств сравнения 3. Блоки 7 умножают сумму токов I_d на коэффициенты пропорции деления $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$, вычисляя, таким образом, уставки системы распределения $I_{d_{oi}} = \gamma_i I_d$.

С выходов блоков сравнения 8 ошибки системы распределения $\varepsilon_i = I_{d_{oi}} - I_{di}$ подаются на регуляторы 2, вырабатывающие корректирующие значения углов регулирования $\delta\alpha_i$, добавочные по отношению к общему значению угла управления α системы регулирования выходного напряжения ГП. Таким образом, углы регулирования выпрямителей равны сумме $\alpha_i = \alpha_{d_{oi}} + \delta\alpha_i$.

Это приводит к соответствующим малым приращениям напряжений на входе инверторов, обеспечивающим уменьшение ошибок ε_i и, в конечном итоге, требуемому распределению потребляемой мощности.

Показано, что чувствительность токов I_{di} к величинам напряжения на входе инверторов достаточно велика, что позволяет вместо требуемого регулирования мощности добиваться соответствующего распределения потребляемых инверторами токов.

Особенностью данного способа распределения является то, что уставки системы, т.е. значения $I_{d_{oi}}$, вычисляются самой схемой по значениям регулируемых токов и, следовательно, во время переходного процесса сами изменяются вместе с их изменением. По этой причине динамика системы распределения, как показывает анализ, достаточно сложна и требует исследования. Главное значение имеет вопрос об устойчивости системы.

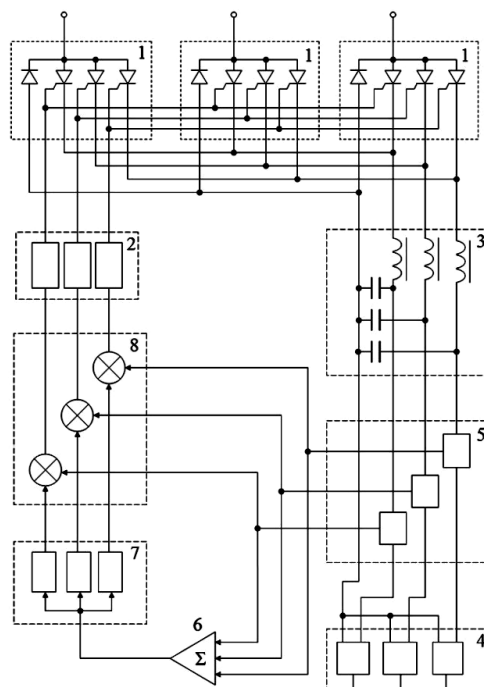


Рис. 1. Групповой преобразователь

Во второй главе исследуется влияние структуры системы распределения на её устойчивость.

С целью исключения влияния на устойчивость системы нелинейной зависимости выходного напряжения выпрямителей они заменены на импульсные регуляторы постоянного тока (ИППТ), питающиеся от источников постоянного напряжения (рис. 2). Кроме того, во второй главе с целью исключения влияния импульсного характера работы инверторов они заменены на линейную стационарную нагрузку. В последующих исследованиях это ограничение снимается.

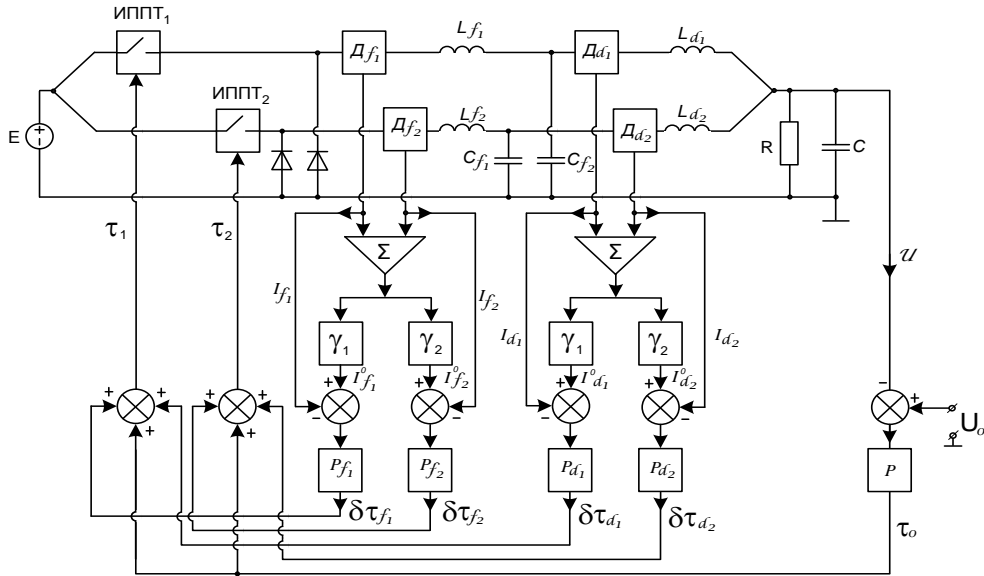


Рис. 2. Система автоматического распределения мощности между двумя АИТ

В схеме рис. 2 по сравнению со схемой рис. 1, помимо обратной связи (ОС), измеряющей входные токи инверторов I_{di} , добавлены цепи ОС, получающие информацию о токах I_{fi} , протекающих через реакторы фильтра. Это позволяет произвести сравнение эффективности обоих способов организации ОС с точки зрения обеспечения устойчивости автоматической системы.

Для случая линейной стационарной нагрузки построена модель замкнутой системы в форме Коши

$$\dot{\vec{X}} = A \cdot \vec{X} + U_0 \cdot \vec{b}, \quad (1)$$

где A – матрица системы порядка 8, элементы которой определяются параметрами элементов силовой схемы, коэффициентами γ_i и коэффициентами усиления K_d регуляторов P_d (ОС по схеме рис. 1) и K_f регуляторов K_f (добавленная цепь ОС по схеме рис. 2).

Исследование системы проводилось корневым методом, для чего на комплексной плоскости строились годографы собственных значений (СЗ) матрицы A .

На рис. 3 и 4 показаны результаты этого исследования. На рис. 3 рассмотрен случай $K_f=0$ (отсутствие регулятора P_d) при изменении K_d в диапазоне, указанном в подрисуночной надписи.

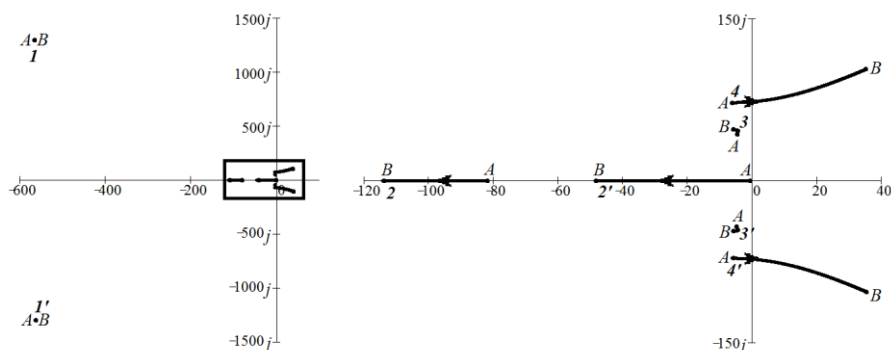


Рис. 3. Годограф СЗ матрицы A при изменении K_d от 0.01 (отмечено A) до 5 (отмечено B) для $K_f=0$

Здесь в левой части рисунка показан годограф целиком, в правой части крупно показан участок, выделенный слева прямоугольником. Очевидно, что система устойчива только в ограниченном диапазоне коэффициента усиления K_d (ветви 4 и 4', соответствующие паре комплексных собственных значений, от точки A ($K_f=0,01$) до пересечения с мнимой осью). Начиная с этой точки, собственные значения этой ветви годографа переходят в правую полуплоскость, то есть система становится неустойчивой.

Аналогичные исследования, но проведенные при $K_d=0$ и изменении коэффициента K_f в том же диапазоне, показывают (рис. 4), что при снятии сигнала ОС с датчиков в ветвях реакторов фильтра система устойчива во всем этом диапазоне, так как все ветви годографа находятся в левой комплексной полуплоскости.

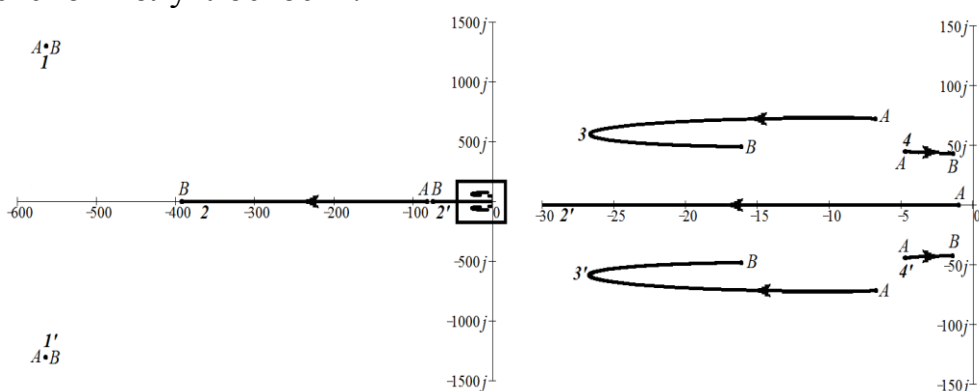


Рис. 4. Годограф СЗ матрицы A модели системы распределения по рис. 2 при изменении K_f от 0.01 (отмечено A) до 5 (отмечено B) и при $K_d=0$

Таким образом, можно сделать вывод, что введение ОС по цепи токов реакторов фильтра расширяет область устойчивости.

В третьей главе приводятся исследования динамики ГП на основе параллельных АИТ (рис. 2), АИТ с тиристорно-реакторными (ТРК) и диодно-реакторными (ДРК) компенсаторами реактивной мощности. Для этих преобразователей построены аналитические модели, которые в силу наличия инверторов являются импульсными и поэтому описываются векторно-матричными разностными уравнениями вида

$$\vec{x}_{n+1} = D\vec{x}_n + F\vec{v}. \quad (2)$$

Матрицы D и F модели замкнутой системы строятся с использованием матричных экспонент, позволяющих записывать решения систем дифференциальных уравнений в компактной форме. Кроме того, для упрощения конечных выражений для матрицы D и F применяется метод одного интервала, использующий симметрию схем инверторов и законов управления их вентилей.

В случае ГП с инверторами с ТРК и ДРК рассматриваются линеаризованные модели. Линеаризация возможна при условии малых изменений углов запираания вентилей, что позволяет считать промежутки неизменности структур схема инвертора постоянными по длительности.

В силу того, что рассматриваемые системы импульсные, для их устойчивости необходимо и достаточно, чтобы собственные значения матрицы D находились внутри единичной окружности комплексной плоскости.

На рис. 5 и 6 приведены годографы системы для ГП на основе АИТ. Здесь подтверждается вывод о расширении диапазона изменения коэффициентов усиления регуляторов при использовании ОС по цепям реакторов L_f , сделанный по результатам главы 2.

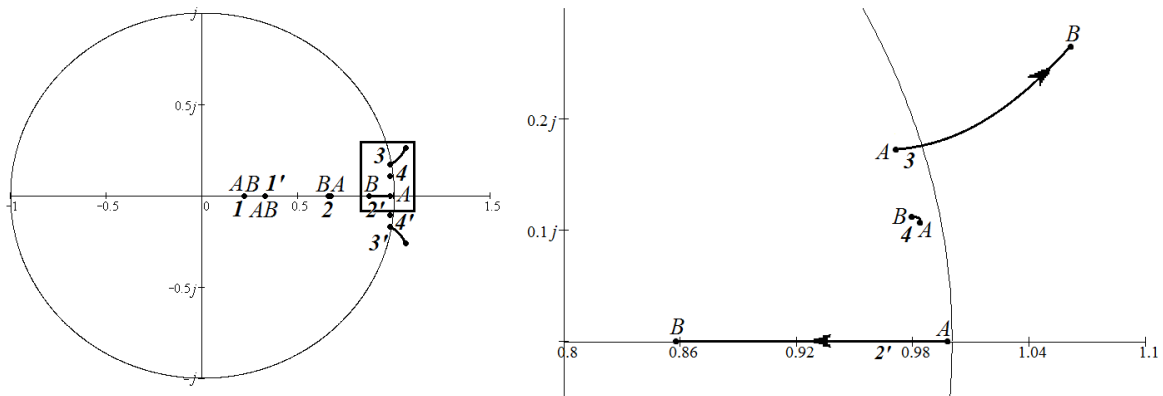


Рис. 5. Годограф СЗ матрицы D модели системы распределения мощности между двумя инверторами при изменении K_d от 0.01 (отмечено буквой A) до 5 (отмечено буквой B) для $K_f = 0$

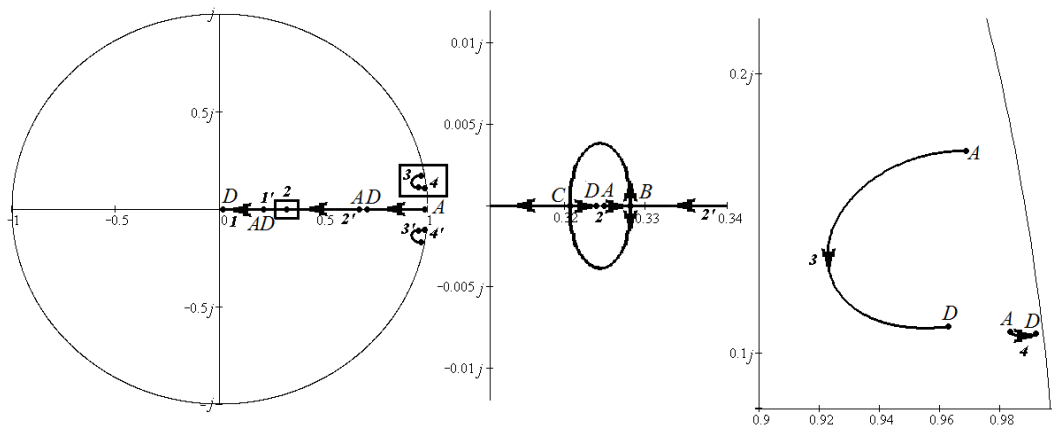


Рис. 6. Годограф СЗ матрицы D модели системы распределения мощности между двумя параллельными инверторами при изменении K_f от 0.01 (отмечено буквой А) до 5 (отмечено буквой D) и $K_d = 0$

На рис. 7 и 8 приведены результаты исследований показателей качества переходных процессов (КПП) от величины коэффициента усиления K_f . В диссертации рассматриваются показатели КПП, адаптированные к исследованию динамики устройств преобразовательной техники. Показатель, характеризующий время затухания переходного процесса, обозначается N_σ , и рассчитывается по формуле

$$N_\sigma = \max_i \frac{\ln \sigma}{\ln |\rho_i|},$$

где ρ_i – модуль i -го СЗ матрицы D .

Смысл этого показателя – число периодов выходной (для инверторов) или входной (для выпрямителей) частоты, за которые огибающая свободной составляющей переходного процесса уменьшается в σ раз. В работе принимается $\sigma = 20$. Показатель КПП ξ , характеризующий колебательность переходного процесса, оценивает число колебаний огибающей переходного процесса за N_σ периодов. Оба показателя определяются по СЗ матрицы модели замкнутой системы распределения.

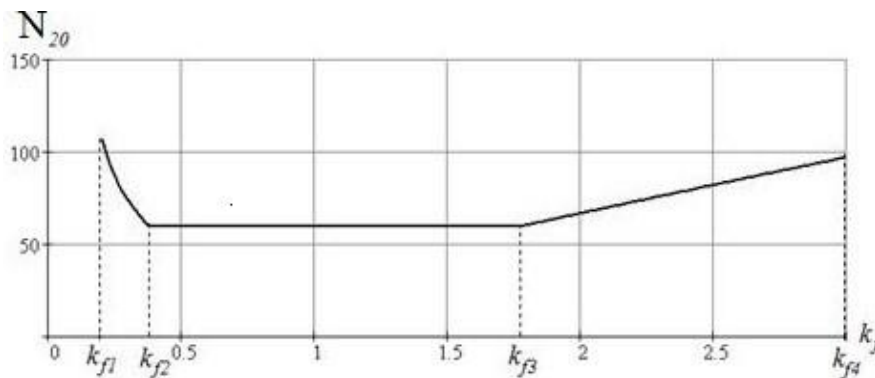


Рис. 7. Зависимость показателя N_{20} от коэффициента усиления регулятора

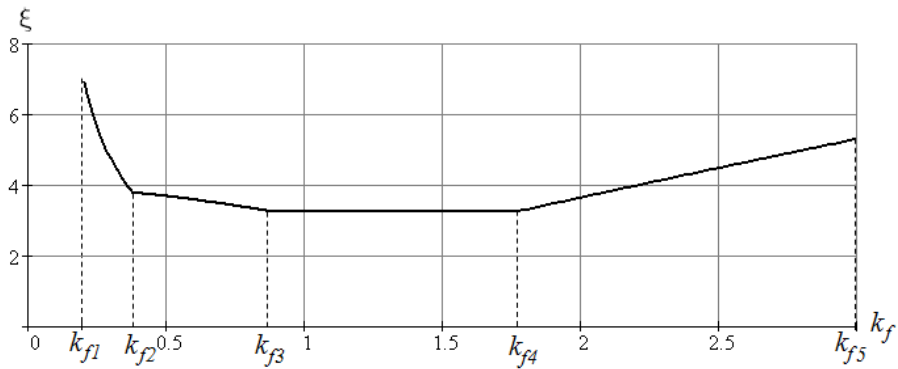


Рис. 8. Зависимость показателя ξ от коэффициента усиления регулятора

Наличие дискретной модели вида (2) для двухмодульного инвертора тока позволило перейти к эквивалентной непрерывной модели, переменные состояния которой являются огибающими для компонент вектора \vec{x} . В результате разработана методика и написана программа для расчета передаточных функций преобразователя, позволяющая переходить от модели ГП в форме Коши к модели «вход-выход». Соответствующая структурная схема системы для двухмодульных ГП приводится в диссертации.

В четвертой главе исследуется ГП на основе регулируемых выпрямителей (рис. 9).

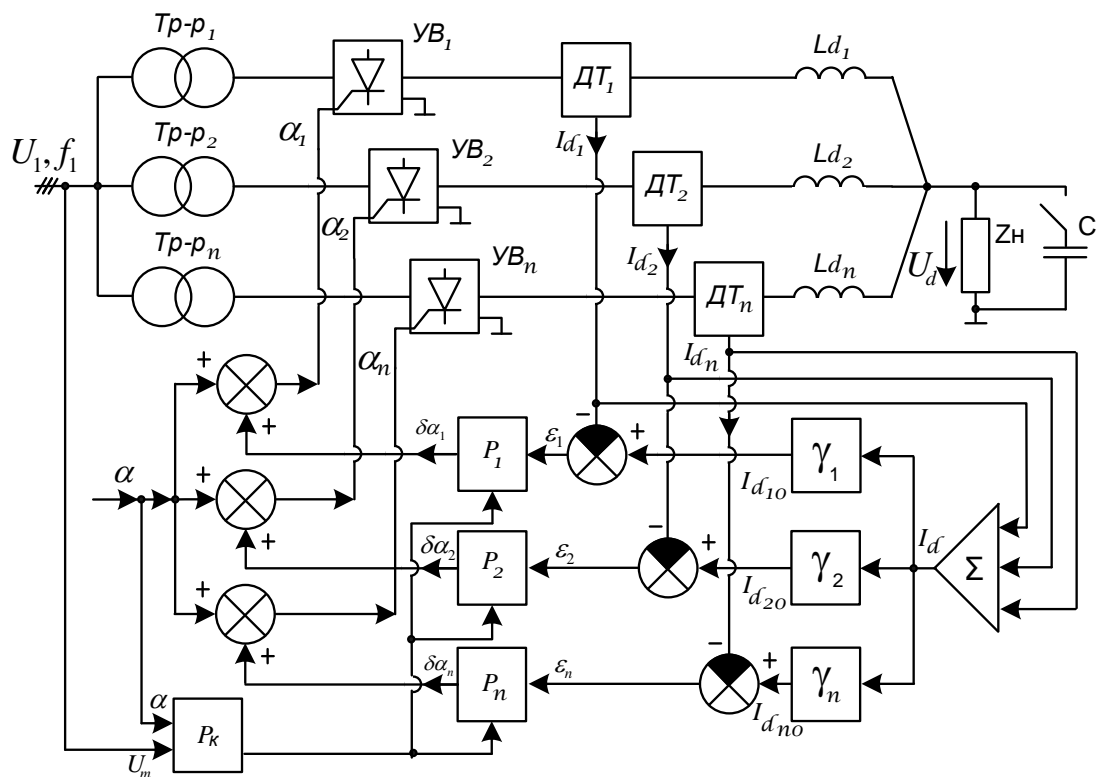


Рис. 9. Структурная схема системы объединенных по выходу управляемых выпрямителей

Линеаризованная модель замкнутой системы здесь имеет вид

$$\bar{x}_{n+1} = D(\alpha)\bar{x}_n + d(\alpha), \quad (3)$$

где матрица, определяющая динамику, зависит от общей для всех выпрямителей составляющей угла регулирования α и равна

$$D(\alpha) = e^{A\tau} (E + K_f U_m \sin \alpha \cdot R^{-1} \cdot G) - U_m \sin \alpha \cdot R^{-1} \cdot G. \quad (4)$$

Для двухмодульной системы матрицы, входящие в эту формулу, имеют простой вид. Например, при $L_{d1} = L_{d2} = L$, матричная экспонента в данном случае легко находится аналитически по формуле Лагранжа – Сильвестра:

$$e^{A\tau} = \begin{bmatrix} e^{-\frac{r_d}{L}\tau} - e^{-\frac{r_d+2r}{L}\tau} & -(e^{-\frac{r_d}{L}\tau} + e^{-\frac{r_d+2r}{L}\tau}) \\ -(e^{-\frac{r_d}{L}\tau} + e^{-\frac{r_d+2r}{L}\tau}) & e^{-\frac{r_d}{L}\tau} - e^{-\frac{r_d+2r}{L}\tau} \end{bmatrix},$$

а матрица G , реализующая заданное распределение мощности в пропорции γ_1 / γ_2 , такова:

$$G = \begin{bmatrix} \gamma_2 & -\gamma_1 \\ -\gamma_2 & \gamma_1 \end{bmatrix}.$$

Исследования двухмодульной системы при активно-емкостной нагрузке подтвердили сильную зависимость динамики системы от угла регулирования выпрямителей. Расчеты показали (табл. 1), что для каждого значения обобщенного коэффициента усиления $K^* = K_f U_m$ существует предельное значение угла регулирования, превышение которого приводит к потере устойчивости системы. При приближении снизу к этому предельному значению резко возрастает время переходного процесса.

Таблица 1. Зависимость показателя N_{20} от угла регулирования α и коэффициента усиления

K^* α эл.гр.	0,001	0,005	0,01	0,015	0,02	0,025	0,03
0	9	9	9	9	9	9	9
6	9	10	10	11	12	13	14
12	9	10	12	14	16	20	26
18	9	11	14	18	26	44	138
24	10	12	16	25	53	*	*
30	10	12	19	40	*	*	*
36	10	13	24	85	*	*	*
42	10	14	30	*	*	*	*
48	10	15	39	*	*	*	*
54	10	16	52	*	*	*	*
60	10	17	75	*	*	*	*

Примечание. Знак * в ячейках таблицы означает, что система при данных параметрах неустойчива.

Причина этого состоит в том, что коэффициент усиления регулятора входит в формулу (4) матрицы модели в произведении с синусом угла регулирования α и величиной амплитуды напряжения сети U_m . Физически это связано с повышением чувствительности токов выпрямительных мостов к углу регулирования при его возрастании. Из этого факта следует невозможность произвольно выбирать коэффициент усиления K_f регуляторов P_1, P_2, \dots, P_n , а необходимо изменять его таким образом, чтобы указанное произведение оставалось равным оптимальному значению во всем диапазоне изменения угла α и напряжения сети.

Таким образом, целесообразно синтезировать нелинейный корректирующий регулятор, обеспечивающий постоянное и оптимальное значение указанного произведения $K_0 = K_f U_m \sin \alpha$.

В диссертации синтезировано устройство (на рис. 9 обозначенное как P_k), аппроксимирующее зависимость $\frac{1}{U_m \sin \alpha}$ при изменении значений α и U_m в заданном диапазоне.

При этом регулятор, коэффициент усиления которого изменяется в соответствии с формулой

$$K_f(\alpha, U_m) = K_0 \left\langle \frac{1}{U_m \sin \alpha} \right\rangle,$$

обеспечивает устойчивую работу системы распределения и требуемые показатели КПП при всех допустимых значениях α и U_m . При синтезе использованы аппроксимирующие свойства нечеткого регулятора Мамдани.

Пятая глава диссертации посвящена исследованию ГП с переменным модульным составом, применение которых позволяет исключить неэффективную работу преобразователя при минимальной нагрузке и обеспечить необходимый запас мощности при нагрузке, близкой к максимальной. Неэффективность ГП с постоянной структурой может возникать при минимальной загрузке, в частности если в качестве модулей применяются АИТ с компенсаторами избыточной реактивной мощности, которые в этом режиме существенно искажают качество кривой выходного напряжения.

Разработан алгоритм автоматического определения необходимости коммутаций компоновок группового преобразователя, основанный на введенном понятии соответствия компоновки нагрузке по двум критериям: степени соответствия по необходимому запасу мощности и степени соответствия по ограничению запаса мощности. Разработаны также алгоритмы определения оптимальной последовательности коммутации модулей по аддитивным критериям (времени затухания переходных процессов, мощности модулей, участвующих в коммутациях).

Эффективность алгоритмов проверена с помощью разработанной компьютерной модели системы с переменной структурой для преобразователя с пятью модулями. На рис. 10 приведены результаты работы программы.

$I_{d1}, I_{d2}, I_{d3}, I_{d4}, I_{d5}, A$

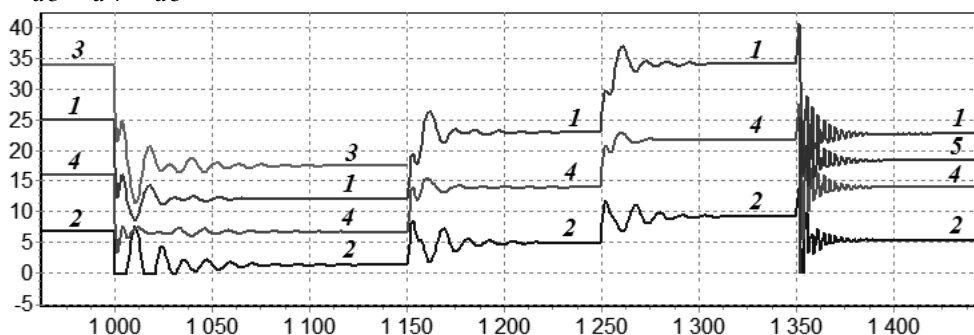


Рис. 10. Результаты моделирования группового преобразователя с переменным модульным составом (оглашающие потребляемых инверторами токов), параметр n – номер периода выходной частоты

Моделирование проводилось при следующих параметрах комплекса. Фильтр: $L_f = L_d = 10 \text{ мГн}$, $C_f = 3000 \text{ мкФ}$, максимальная емкость коммутирующей батареи $C = 900 \text{ мкФ}$, индуктивность компенсатора $L_k = 100 \text{ мкГн}$, частота $f = 200 \text{ Гц}$.

Результаты моделирования отображают следующие процессы в системе: при $n < 1000$ нагрузка номинальная, система распределяет потребляемые токи и, следовательно, мощность между преобразователями в соответствии с исходными значениями коэффициентов $\gamma_1 = 0.3$, $\gamma_2 = 0.1$, $\gamma_3 = 0.4$, $\gamma_4 = 0.2$, $\gamma_5 = 0$. В момент $n_1 = 1000$ происходит резкое уменьшение нагрузки. В момент $n_2 = 1150$ отключается третий преобразователь и реализует новые значения коэффициентов $\gamma_1 = 1/2$, $\gamma_2 = 1/6$, $\gamma_3 = 0$, $\gamma_4 = 1/3$, $\gamma_5 = 0$. В момент $n_3 = 1250$ происходит увеличение нагрузки. В момент $n_4 = 1350$ подключается пятый преобразователь и реализует новые значения коэффициентов $\gamma_1 = 30/85$, $\gamma_2 = 10/85$, $\gamma_3 = 0$, $\gamma_4 = 20/85$, $\gamma_5 = 25/85$.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Основные результаты работы состоят в следующем:

1. Анализ известных технических решений по автоматическому распределению нагрузки между модулями различной мощности позволяет сформулировать общий принцип построения ГП, основанный на использовании в качестве источников управляющих сигналов силовых модулей преобразователя. Наиболее важными задачами, подлежащими решению, являются вопросы построения математических моделей систем распределения и исследование их динамики (устойчивость, качество переходных процессов).

2. Исследование базовой системы распределения обнаруживает явление потери устойчивости при значениях коэффициента усиления регулятора, необходимых для обеспечения необходимой статической точности. Исследования обобщенной модели показали, что для расширения области устойчивости системы в пространстве ее параметров необходимо снимать сигналы обратной связи с ветвей, содержащих реакторы фильтра постоянного тока. Этот вывод подтвержден исследованиями систем распределения нагрузки между инверторами тока и инверторами с тиристорно-реакторными и диодно-реакторными компенсаторами.

3. Компьютерные исследования построенных аналитических математических моделей систем распределения нагрузки между инверторами тока и инверторами с тиристорно-реакторными и диодно-реакторными компенсаторами позволили получить зависимости показателей качества переходных процессов в системах от параметров силовой схемы и коэффициентов усиления регуляторов, необходимые при инженерных расчетах преобразователей.

4. Установлено, что при близких значениях параметров силовых схем модулей (до 10%) изменение коэффициентов пропорции распределения не влияет на показатели динамики (время регулирования, колебательность).

5. Математическая модель системы распределения нагрузки между объединенными по выходу регулируемые выпрямителями является нелинейной из-за нелинейной зависимости выходного напряжения преобразователя от угла регулирования. Линеаризованная система разностных уравнений системы распределения дает результаты, отличающиеся от результатов компьютерного моделирования нелинейной системы не более чем на 2-3 % ввиду малых отклонений углов регулирования выпрямителей от базового значения. Это объясняется высокой чувствительностью выбранного способа управления к ошибкам распределения.

6. Исследования линеаризованной модели позволили установить сильную зависимость показателей переходных процессов от угла регулирования, увеличение которого приводит к потере устойчивости. Указанный факт связан с вхождением коэффициента усилителя регулятора в выражение матрицы модели замкнутой системы в произведении с синусом угла регулирования, что равносильно монотонно возрастающей зависимости эквивалентного коэффициента усиления от этого угла. Для устранения этого эффекта в систему введен корректирующий блок, компенсирующий указанную зависимость, выполненный в виде нечеткого регулятора.

7. При организации электропитания с помощью группового преобразователя, мощность модулей которого значительно меньше

максимального значения мощности нагрузки, целесообразно изменять модульный состав преобразователя в функции нагрузки. Это позволит исключить неэффективную работу преобразователя при минимальной нагрузке и обеспечивать необходимый запас мощности при нагрузке, близкой к максимальной. Для исследования групповых преобразователей с переменным модульным составом разработана математическая модель, основанная на элементах теории оптимизации на графах. Разработаны алгоритмы автоматического определения необходимости коммутаций компоновок группового преобразователя, основанные на введенном понятии соответствия компоновки нагрузке по двум критериям: степени соответствия по необходимому запасу мощности и степени соответствия по ограничению запаса мощности.

Основные положения диссертации отражены в публикациях автора:

***В изданиях, входящих в перечень изданий,
рекомендованных ВАК РФ***

1. Астапович Ю. М. Гибкая система управления объединенными по выходу преобразовательными агрегатами / Ю. М. Астапович, Е. Е. Миргородская, Н.П. Митяшин // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2013. – № 2 (70). – Вып. 1. – С. 147-150.

2. Астапович Ю. М. Построение передаточных функций автономных инверторов / Ю.М. Астапович, М.В. Радионова, Н.П. Митяшин // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 1; URL: <http://www.science-education.ru/107-8307>.

3. Астапович Ю. М. Автоматическое распределение нагрузки между параллельно работающими агрегатами / Ю. М. Астапович, Н. П. Митяшин, Р. А. Билюков, Н. А. Калистратов // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 1; URL: <http://www.science-education.ru/107-8571> .

4. Астапович Ю.М. Динамическая модель системы распределения мощности между компенсированными инверторами тока / Ю. М. Астапович, Е. Е. Миргородская, Н. П. Митяшин, Н. Н. Максимова // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6; URL: <http://www.science-education.ru/113-10837> .

В других изданиях

5. Астапович Ю. М. Динамические модели групповых выпрямителей для питания электротехнологических установок / Н. П. Митяшин, Ю. Б. Томашевский, Ю. М. Астапович, Е. Е. Миргородская // Вопросы электротехнологии. – 2013. – № 1. – С. 54-60.

6. Астапович Ю. М. Динамика параллельно включенных полупроводниковых источников питания / Ю. М. Астапович, Е. Е. Миргородская, Н. П. Митяшин, А. А. Стаценко // Проблемы управления, обработки и передачи информации (АТМ-2013): сб. тр. III Междунар. науч. конф.: в 2 т. – Саратов: Изд. дом «Райт-Экспо», 2013. – Т. 1. – С. 190-197.

7. Астапович Ю. М. Передаточные функции многомостовых инверторов/ Ю. М. Астапович, Н. Н. Максимова, Н. П. Митяшин // Проблемы управления, обработки и передачи информации (АТМ-2013): сб. тр. III Междунар. науч. конф.: в 2 т. Саратов: Изд. дом «Райт-Экспо», 2013. – Т. 1. – С. 198-202.

8. Астапович Ю. М. Управление параллельно работающими силовыми преобразователями / Ю. М. Астапович, Е. Е. Миргородская, Н. П. Митяшин, А.А. Стаценко // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-26: сб. тр. XXVI Междунар. науч. конф.: в 12 т. – Н.Новгород: НГТУ, 2013. – Т. 9. Секция 11. – С. 286-288.

9. Астапович Ю. М. Управление потоками ресурсов в системах энергоснабжения / Ю. М. Астапович, Р. А. Билюков, Н. П. Митяшин, Д. Э. Тарасов // Логистика и экономика ресурсоэнергосбережения в промышленности (МНПК «ЛЭРЭП-6-2012»): сб. науч. тр. по материалам VI Междунар. науч.-практ. конф., Саратов, 11-13 декабря 2012 г. – Саратов, 2012. – С. 123-124.

10. Астапович Ю. М. Математическая модель системы распределения мощности между параллельными инверторами тока / Ю. М. Астапович, Е. Е. Миргородская, Н. Н. Максимова, Н. П. Митяшин / Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-26: сб. тр. XXVI Междунар. науч. конф.: в 2 ч. Ч. 2. – Ангарск: Ангарск. гос. технол. акад.; Иркутск: Иркут. гос. ун-т, 2013. – С. 150-154.

11. Программа для расчета передаточной функции автономного инвертора тока. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013615399. Правообладатели Астапович Ю. М., Митяшин Н. П., Радионова М. В., Куликов В. Д., Максимова Н. Н. Заявка № 2013612800 Дата поступления 3 апреля 2013 года Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 6 июня 2013 г.

Подписано в печать 20.11.13

Бум. офсет.

Тираж 100 экз.

Усл. печ. л. 1,0

Заказ 193

Формат 60×84 1/16

Уч.-изд. л. 1,0

Бесплатно

Саратовский государственный технический университет

410054, Саратов, Политехническая ул., 77

Отпечатано в Издательстве СГТУ. 410054, Саратов, Политехническая ул., 77

Тел.: 24-95-70; 99-87-39, e-mail: izdat@sstu.ru

