

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ  
ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

На правах рукописи

НОВОСЕЛЫЦЕВ Александр Викторович

ТЕОРИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА АВТОНОМНЫХ  
ИНВЕРТОРОВ НА ОСНОВЕ "КИНЕМАТИЧЕСКИХ"  
МОДЕЛЕЙ ДВИЖЕНИЯ

Специальности: 05.09.12 - Полупроводниковые  
преобразователи электроэнергии,  
05.09.05 - теоретическая электро-  
техника

А в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Киев - 1992

Работа выполнена в Институте проблем энергосбережения  
АН Украины

Официальные оппоненты: академик АН Украины, доктор технических  
наук, профессор Г.Е. Пухов

доктор технических наук, профессор  
В.А. Ласунцов

доктор технических наук, профессор  
В.И. Сенько

Ведущая организация - ЭНИН им. Г.М. Кржиженовского

Защита состоится *"25 ноября"* 1992 г. в *11* час. на заседании  
специализированного совета Д.016.30.03 при Институте электродина-  
мики АН Украины.

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по  
адресу: 252680, Киев-57, пр.Победы, 56, спецсовет Д.016.30.03.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института электро-  
динамики АН Украины.

Автореферат разослан *"23 октября"* 1992 г.

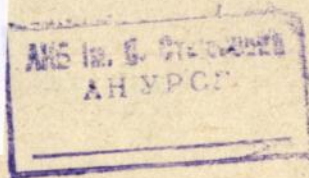
УЧЕНЫМ СЕКРЕТАРЬ  
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО СОВЕТА  
ДОКТОР ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

В.С. ФЕДИИ

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00816256 (S)



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Объективные тенденции, характеризующие рост эффективности и качества электрической энергии в промышленно развитых странах, подтверждают целесообразность увеличения в общем объеме конечной энергии доли преобразованных ее видов до 50 - 60%. В то же время на Украине эта доля составляет порядка 30%, что приводит к многомиллиардным потерям энергии (45-55 млрд.кВт-ч. в год). Отставание отечественной науки и промышленности в этом плане связано как с отсутствием соответствующей производственной базы, так и с недостаточным развитием общей теории преобразователей, в частности теории многокритериального параметрического синтеза преобразователей постоянного напряжения в переменное - автономных инверторов (АИ). Последнее объясняется высокими размерностями (10-20 порядка) динамических моделей АИ, разнородным и дискретным характером их варьируемых параметров, многоэкстремальностью, противоречивостью и сложным (недифференцируемым в отдельных точках) рельефом критериев оптимальности АИ. Трудности синтеза усугубляются нелинейным характером электрических цепей (ЭЦ) преобразователей, который обуславливает появление высших гармоник в токах и напряжениях АИ, приводит к повышенному нагреву его элементов, сбоям и помехам в работе расположенных рядом ЭВМ, радиоэлектронных устройств, систем управления и защиты, ухудшает динамические показатели систем связи и навигации.

Учитывая важность и актуальность проблемы повышения эффективности и качества преобразования электроэнергии, вопросами параметрического синтеза АИ активно занимались и занимаются такие ученые, как Р.Х.Бальян, Е.И.Беркович, Ю.И.Болотовский, А.С.Васильев, А.П.Воселовский, М.В.Гельман, М.М.Глибицкий, П.В.Голубев, Э.Н.Гречко, С.В.Дзливев, А.В.Донской, Н.С.Комаров, Ф.Б.Конев, Ю.Е.Кулешов, В.А.Лабунцов, Н.Н.Лаптев, К.А.Липковский, В.С.Моин, Г.М.Мустафа, Г.Г.Пивняк, В.И.Сенько, В.Е.Тонкаль, Ю.К.Черных, С.В.Шапиро, В.В.Шипицын, а также П.Вуд, Н.Гоуэл, Р.Истер, Е.Иэсон, Т.Лиссак, Т.Ниномида, М.Слоним, П.Стюарт, П.Суерленд, Т.Танака, Л.Феррейра, К.Хилл и др. В результате проведенных научно-исследовательских и проектно-конструкторских работ многие из практически важных задач параметрического синтеза преобразователей уже нашли свое решение. В частности, решены задачи синтеза параметров пассивных фильтров, синтеза формы кривой выходного напряжения, скалярной оптимизации параметров ЭЦ, оптимизации управления вентилями АИ. В то же время системная постановка задачи параметрического синтеза, которая бы единым образом охватывала все основные узлы

и блоки АИ, практически не разработана. В итоге это приводит к неоптимальному конечному результату, поскольку известно, что каждое частное оптимальное решение, как правило, не является таковым в общесистемной постановке из-за неполноты учета системных целей.

Настоятельная потребность комплексного (общесистемного) устранения или ослабления перечисленных недостатков и трудностей, а также необходимость выявления других возможных резервов совершенствования устройств преобразовательной техники, реализуемых в рамках системного параметрического синтеза АИ, обусловили появление настоящей диссертации, которая подводит итог многолетней работы автора в отделе моделирования и оптимизации систем с полупроводниковыми преобразователями электроэнергии Института электродинамики (ИЭД), а затем Института проблем энергосбережения (ИПЭ) АН Украины. Научные исследования велись под руководством и при непосредственном участии автора по государственными темам "Импульс" (1979-1982 гг., Пост. Президиума АН УССР №601 от 14.12.78 г., № Гос.регистр. 79059595), "Ключ" (1983-1986 гг., Пост. ГКНТ СССР №155 от 30.04.82 г., № Гос.регистр. 01.83.002 0682), "Криотрон" (1985-1987 гг., Пост. ГКНТ СССР №464 от 05.09.85 г., № Гос.регистр. 01.86.0032911), "Конус" (1987-1990 гг., Пост. Президиума АН УССР №451 от 29.12.86 г., № Гос.регистр. 01.87.0052774), "Трембита" (1988-1990 гг., Пост. ГКНТ СССР №27 от 20.07.88 г., № Гос.регистр. 01.89.0024480), "Доминанта-2" (1988-1991 гг., Пост. Президиума АН Украины №402 от 11.12.87 г., № Гос.регистр. 01.88.0019095), которые выполнялись в рамках координационных планов НИР СМ СССР, ГКНТ СССР, АН СССР и АН Украины по комплексным проблемам "Научные основы электроэнергетики" и "Научные основы энергосбережения", а также в рамках крупного международного целевого проекта "Сильноточные устройства с использованием сверхпроводников, работающих при различных температурах" (задание 6.2.4.5).

Целью диссертационной работы являются разработка теоретических положений системного параметрического синтеза автономных инверторов и создание на этой основе новых устройств преобразовательной техники, оптимальных по совокупности показателей качества.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- выявление системных свойств и закономерностей, присущих процессам преобразования энергии в пространстве - структуре ЭЦ АИ;
- разработка содержательных и формальных моделей теории системного параметрического синтеза АИ;
- определение энергетических критериев качества и обоснование

принципа оптимальности ЭЦ АИ;

- исследование алгоритмов параметрического синтеза ЭЦ АИ и определение способов повышения их эффективности;

- разработка и параметрический синтез силовых структур преобразователей, способов и устройств их управления;

- практическая реализация и технико-экономические обоснования синтезированных устройств, их опытная проверка и внедрение.

Методы исследования. При решении сформулированных задач использованы базовые понятия и законы теории ЭЦ с управляемыми вентильями, элементы теории полу- и сверхпроводниковых преобразователей, экстремальные принципы аналитической механики и систем оптимального управления, математический аппарат сопряженных функций, численно-аналитические методы анализа чувствительности ЭЦ, численные методы и алгоритмы многокритериальной оптимизации и параметрического синтеза электротехнических устройств и систем на их основе. Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждена экспериментально в лабораторных и промышленных условиях.

Научная новизна полученных результатов:

- предложены и разработаны основные теоретические положения и принципы параметрического синтеза ЭЦ АИ, которые базируются на физически прозрачных "кинематических" моделях движения, единым образом отображающих свойства симметрии, сохранения и экстремальности электромагнитных процессов, протекающих в разнородных элементах ЭЦ АИ, определены способы повышения эффективности программных и технических средств оптимального многокритериального синтеза АИ, получены результаты синтеза, превосходящие известные по совокупности показателей качества;

- установлены ранее неизвестные "кинематические" закономерности и свойства движения в линейной ЭЦ, определены вид и форма уравнений, отображающих эти закономерности, найдены общие и частные решения уравнений, обоснован физический смысл их коэффициентов;

- установлены энергетические инварианты преобразований над линеалами токов и напряжений, получены прямые определения составляющих полной мощности в виде слабых интегральных форм теоремы Телледжена, разработаны новые способы минимизации неактивных составляющих полной мощности, установлены предельные уровни их эффективности;

- разработан и сформулирован принцип оптимальности движения в ЭЦ, определены вид и форма обобщенной векторной целевой функции АИ, содержащей свободную (объективную) и вынужденную (субъективную)

группы локальных составляющих, разработан оригинальный алгоритм, который учитывает "кинематические" связи между этими группами составляющих, что в совокупности позволяет целенаправленно сужать область поиска приближенно эффективных решений АИ;

- впервые систематизирована и решена в полном объеме задача анализа чувствительности энергетических целевых функций ЭЦ АИ по параметрам и начальным значениям для гладких, с изломами и скачками формы кривых токов и напряжений, причем впервые определены составляющие недифференцируемой в отдельных точках целевой функции;

- предложена оригинальная процедура алгоритма обобщенного самообучения, которая позволяет реализовать структурно-параметрическую адаптацию пакета программы случайного поиска и тем самым повысить быстродействие и надежность его работы;

- сформулированы принципы построения и разработаны новые схемотехнические решения инверторов модуляционного типа, оригинальные узлы коммутации, системы управления, регулирования, пуска и защиты, которые позволяют в совокупности с процедурами параметрического синтеза дополнительно повысить эффективность процессов преобразования параметров электрической энергии.

Практическая ценность. Использование новых научных положений, обоснованных в диссертационной работе, позволило формализовать процедуры параметрического синтеза АИ и тем самым синтезировать параметры АИ, оптимальные по совокупности физически разнородных локальных критериев качества, число которых ограничено только возможностями памяти ЭВМ; разработать и внедрить адаптивные алгоритмы и пакеты программ параметрического синтеза АИ, работоспособные в условиях априори неисследованного объекта; повысить быстродействие и точность нахождения глобального экстремума параметров АИ путем вычисления почти-градиентов на конечных этапах синтеза; формальным образом выделить области существования оптимальных режимов и параметров АИ, включая области высокой коммутационной устойчивости в установившихся и переходных режимах; создать автоматизированный информационно-измерительный комплекс на базе трехмашинной системы "Мера-60" и аппаратуры "КАМАК" для регистрации, хранения и математической обработки результатов сопоставительного анализа вычислительных и натуральных экспериментов с целью дискретного выбора параметров реального оборудования АИ; разработать и внедрить ряд новых высокоэффективных автономных инверторов, преобразователей частоты и систем электропитания на их основе; использовать отдельные результаты исследований в учебном процессе студентов и

аспирантов.

Основные положения, выносимые на защиту:

- оригинальная теория параметрического синтеза АИ;
- новые аспекты метода кинематических аналогий в электротехнике и преобразовательной технике;
- принцип оптимальности движения в ЭЦ АИ;
- способ параметрического синтеза формы кривых напряжения;
- способ минимизации неактивных составляющих мощности;
- алгоритм многокритериального параметрического синтеза;
- методика анализа чувствительности целевых функций АИ;
- теория статических сверхпроводниковых преобразователей;
- новые схемы, узлы коммутации, пуска и защиты, способы и устройства управления и регулирования инверторов;
- результаты параметрического синтеза инверторов и их использование при создании преобразовательных устройств различного функционального назначения.

Реализация результатов работы. Теоретические положения и практические результаты диссертационной работы положены в основу ряда разработок, выполненных под руководством и при участии автора в 1982-1991 гг. по хозяйственным договорам с заинтересованными организациями и предприятиями: №И4-82 (г. Ленинград, Гидрография), №И9-83 (г. Баку, ЦНИИ "Норд"), №И25-84, 937-85, 136-86, 138-87, 959-88 (г. Запорожье, ЗПО "Преобразователь"), №933-85 (г. Ленинград, ЛПИ), №952-88, 683-91 (г. Москва, НИИРФ), №605-88, 607-90 (г. Москва, ЭНИИ), №626-91 (г. Н. Новгород, НПО "Полет"), предназначенных для питания разветвленных электронно-вычислительных и радиотехнических комплексов систем радиолокационной и навигационной техники, включая системы, работающие на предельно низких частотах. В частности, система электропитания с двухзвенным тиристорным преобразователем частоты ТПТ-125-230-400 мощностью 50 кВА производится серийно на ЗПО "Преобразователь", ряд передающих станций электромагнитных навигационных систем мощностью до 5 кВА (4 модификации) изготовлены малой (9 шт.) серией СКТЕ ИЭД АН Украины и используются в гидрографии, малая серия (7 шт.) сверхпроводниковых преобразователей для запитки высокостабильной магнитной системы током до 120 А изготовлена СКТЕ ИПЭ АН Украины и используется в радиофизических исследованиях. Разработан и внедрен ряд единичных изделий, создан автоматизированный информационно-измерительный стенд, содержащий набор силовых (до 1 кА) полупроводниковых и сверхпроводниковых преобразователей. Один оригиналь-

ный и два модернизированных универсальных пакета прикладных программ внедрены в 8-ми организациях. Всего по теме диссертации имеется 33 акта внедрения изделий, методик и программных средств, включая 4 акта об использовании изобретений. Суммарный годовой экономический эффект от внедрения разработок с учетом долевого участия автора составляет 366,4 тыс.руб., а за все время их использования - более 1 млн.руб.

Апробация работы. Основные положения диссертации обсуждались на 13 Международных и 20 Всесоюзных научно-технических конференциях, в том числе: по проблемам преобразовательной техники и силовой электроники (Киев (1975, 1979, 1983), Будапешт (1981, 1985), София (1983), Уфа (1987), Запорожье (1985), Миасс (1989), Челябинск (1985), Чернигов (1987, 1991), Рига (1991)), по теоретическим основам электротехники (Ташкент (1982), Черкассы (1988)), по электромагнитной совместимости преобразователей Таллинн (1982, 1986, 1990), Токио (1984), Вроцлав (1986), Бангалор (Индия, 1987, 1989)), по системному моделированию и оптимальному управлению (Торонто (1986), Закопане (1986), Баку (1987), Москва (1987, 1990), Саранск (1987), Таллинн (1987), Каунас (1988), Днепрпетровск (1990), Киев (1990)).

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 4 монографиях, 15 препринтах, 99 статьях и докладах. Приоритет основных технических решений, предложенных и разработанных в диссертации, защищен 54 авторскими свидетельствами на изобретения.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения, списка литературы из 323 наименований и приложения, содержит 296 страниц основного текста, 36 страниц рисунков и 16 страниц таблиц, а также 27 страниц текста и 21 страницу рисунков приложения с кратким описанием технических характеристик разработанных устройств, аппаратных и программных средств.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана оценка современного состояния проблемы, поставлена задача, определена цель и перечислены методы исследования, сформулированы научная новизна и практическая ценность, освещены основные результаты диссертационной работы и ее апробация.

В первой главе рассмотрены основные понятия и принципы построения теории параметрического синтеза АИ и преобразователей на их основе. Показаны сложность и специфические особенности структуры АИ, содержащей большое число взаимосвязанных разнородных элементов силовой цепи и системы управления, проанализированы методы и мате-

матические модели, учитывающие скачкообразный характер изменения параметров вентиляльных элементов, рассмотрены методы и алгоритмы оптимизации, работающие в условиях многоэкстремальности и недоопределенности целевых функций АИ. Проведенный анализ современного состояния задачи параметрического синтеза АИ позволил систематизировать общепринятые в теории преобразователей исходные допущения и ограничения в следующем виде: задача анализа нелинейной силовой ЭЦ АИ априори решена, т.е. известны мгновенные значения всех токов и напряжений в цепи, рассматриваются кусочно-линейные ЭЦ с сосредоточенными параметрами, описываемые кусочно-линейными системами обыкновенных дифференциальных уравнений с периодически скачкообразно изменяющимися коэффициентами, теория синтеза активно формирует только внешнее по отношению к звяжкам сосредоточенных элементов ЭЦ линейное однородное пространство критериев оптимальности, теория сопоставляет (сравнивает) равнообразные формы и виды преобразования параметров энергии в ЭЦ АИ путем их теплового эквивалентирования.

В соответствии с принятой идеализацией формируется обобщенная модель параметрического синтеза АИ в виде системной процедуры целенаправленного движения (изменения) совокупности параметров, отображающих инвертор как цельное электротехническое устройство, из начального (исходного) положения в положение с экстремальными значениями этих параметров, включая движение параметров источников питания, топологических параметров структуры ЭЦ АИ, сосредоточенных параметров  $R, G, L, C$  - элементов цепи и параметров управления вентиляей, в рамках, ограниченных законами ЭЦ с вентилями и предельно-допустимыми значениями параметров элементов цепи и переменных ее состояния.

Сопоставительный анализ обобщенной и существующих моделей показал, что решение задачи параметрического синтеза АИ в настоящее время осуществляется путем рывка динамических связей между отдельными функциональными блоками и узлами АИ и исследования их отдельно по частям. В результате существующее многообразие локальных критериев оптимальности АИ, используемых в качестве целевых функций отдельных узлов и блоков, недостаточно полно и всесторонне отображает системные цели синтезируемого объекта, поскольку не учитывает внешние по отношению к этим блокам динамические воздействия, связи и ограничения.

Опираясь на работы Л.А.Мелентьева, А.А.Харкевича, Н.Ф.Овчинникова, М.Месаровича и др. в диссертации формулируются основные системные принципы построения теории параметрического синтеза АИ, позволяющие

равноправным образом учитывать целевые функции отдельных элементов, узлов и инвертора как системы. Структура разработанной теории параметрического синтеза АИ представлена на рис. I. В качестве

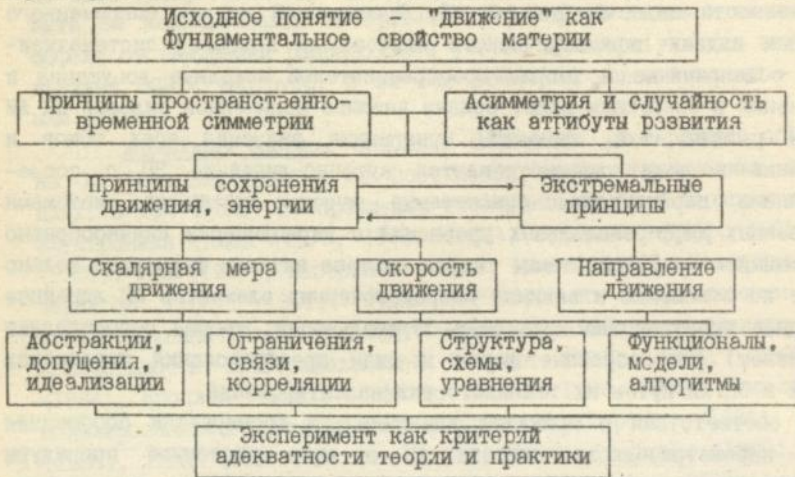


Рис. I

связующего общесистемного начала, которое объединяет в единое целое все звенья, элементы, процессы, алгоритмы и процедуры параметрического синтеза АИ, теория использует понятие "движение", рассматриваемое как "изменение вообще", изменение в противоречивом единстве изменчивости и устойчивости, а под понятием "энергия" - общую количественную меру движения. Ф.Энгельс пишет: "Движение, рассматриваемое в самом общем смысле слова, т.е. понимаемое как способ существования материи, как внутренне присущий материи атрибут, обнимает собой все происходящее во вселенной изменения и процессы, начиная от простого перемещения и кончая мышлением...". Такое понимание "движения", как никакое другое, объединяет отдельные слагаемые теории параметрического синтеза АИ, включая "движение" параметров электромагнитных процессов, алгоритмов оптимизации и процедур принятия решений, множество локальных показателей качества которых не содержит формальных условий для их объективного сравнения и преобразования в системную целевую функцию и требует для своего разрешения обязательного привлечения эвристических (субъективных) представлений.

Анализ публикаций в области теории выбора и принятия решений показал, что противоречия между "субъективными" и "объективными" аспектами движения не будут носить принципиального характера и, поэтому

могут быть разрешены в рамках известных методов И.М.Соболя - Р.Б.Статникова, В.С.Михалевича, В.В.Хоменюка, Б.Руа и др., если воспользоваться идеей общего для всех элементов инвертора, реально существующего и объединяющего эти элементы, физического пространства ЭЦ АИ. Такая постановка задачи, опираясь на известный математический аппарат теории выбора, позволяет получать и принципиально новые результаты синтеза, поскольку использует дополнительные физически объективные связи, возникающие между разнообразными показателями качества АИ в условиях единого физического пространства. Что касается физического содержания самого понятия движения и его меры в статических (неподвижных) ЭЦ, то после работ В.Ф.Миткевича автору не известны публикации, посвященные этой теме. Проблема заключается в том, что статические ЭЦ характеризуются скрытыми от непосредственного (визуального) наблюдения формами движения, для которых отсутствует реальный кинематический (геометрический) образ, переводящий эти скрытые формы в наблюдаемые (осознаваемые). В то же время знание геометрической формы "объекта" и траектории его движения многое проясняет в задаче параметрического синтеза АИ. В частности, априори известной становится экстремальная "форма" целевой функции, соответственно упрощаются процедуры вычисления градиента движения "объекта" к цели, появляется возможность симметрирования параметров "объекта", начинают работать экстремальные геометрические закономерности. Благодаря этому задача параметрического синтеза АИ становится не только физически прозрачной, но и получает для своего решения мощный математический аппарат современной геометрии и кинематики.

*Вторая глава* посвящена построению содержательных и формальных моделей метода кинематических аналогий (МКА) для линейной ЭЦ с сосредоточенными параметрами. Согласно определению основателя МКА А.Ампера, кинематика есть не что иное, как геометрия, в которой независимой переменной служит время, движущийся объект в кинематике важен лишь по своей форме и по своему положению, это объект геометрический: точка, линия, поверхность, тело или совокупность их. Если в качестве отдельных "объектов" исследования рассматривать токи ( $i$ ) и напряжения ( $u$ ), то "кинематическая" форма каждого из них будет определяться как траектория (линия) движения во времени концов вектор-функций ( $\vec{i}$ ), ( $\vec{u}$ ) этих токов и напряжений. В общем случае вектор-функциями от параметров  $\alpha(t, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$  будем называть векторы, изображающие  $u, i$  в многомерном пространстве, модули и направления которых зависят от  $\alpha$ . При изменении параметров, например ЭДС, индуктивностей  $L$ , емкостей  $C$ ,

сопротивлений  $R$  и проводимостей  $G$ , концы  $\vec{u}$ ,  $\vec{i}$  перемещаются по  $n$ -мерной поверхности движения, которая в соответствии с определением также характеризуется  $n$ -мерной "кинематической" формой. Аналогично в полном соответствии с классическими определениями аналитической механики в данной работе рассматриваются понятия параметрической скорости и параметрического ускорения (кривизны), где в качестве переменной используется не только время, но и любые другие параметры, характеризующие движение в ЭЦ. Никаких математических (формальных) недоразумений и сложностей кажущееся разнообразие новых определений и понятий не вносит в теорию ЭЦ, поскольку кинематика тем и отличается от других подходов, что рассматривает только геометрическую сторону любых, в том числе разнородных процессов и явлений вне зависимости от природы сил, их обуславливающих, благодаря чему и появляются новые возможности корректного их обобщения в системной задаче параметрического синтеза. Являясь недостатком (слабой стороной) при анализе движения, это свойство МКА оказывается решающим для использования при синтезе ЭЦ АИ, электромагнитное состояние которых полностью определяется "кинематическими" характеристиками поверхностей движения  $\vec{u}$ ,  $\vec{i}$ , в частности, амплитудой, частотой, гармоническим составом и т.д., токов и напряжений.

Идея МКА проста. С одной стороны, "кинематической" формой обладает поверхность движения любых вектор-функций, в том числе отображающих движение в пространстве - структуре ЭЦ, будь то поверхность "движения" вектор-функций электромагнитной энергии, времени выключения вентилей и т.д. С другой стороны, любое изменение формы поверхности движения однозначно связано с дополнительными затратами энергии, "действия" и т.д. Отсюда очевидна целесообразность (принцип) общесистемной минимизации величины суммарных изменений формы поверхностей движения в элементах ЭЦ относительно величины полезной (с точки зрения субъекта) составляющей этого движения, тем более, что в методе МКА процедура минимизации всегда определена. Как показано в работах Г.Герца, этот принцип охватывает собой практически все многообразие экстремальных "действий" аналитической механики, по сути являясь формализованным средством построения общесистемной функции полезности в задаче многокритериального (векторного) синтеза параметров "кинематических" моделей движения. Общее содержание принципа Г.Герца можно сформулировать следующим образом: для любого естественного (свободного от действия сил) движения существует экстремальная геометрическая форма, движение по которой происходит вдоль прямойшего

или кратчайшего пути за кратчайшее время.

Подтверждением существования такого рода "действий" в электротехнике служит синусоидальная форма кривой напряжения (тока), которая в большинстве практических применений является обязательным сопутствующим признаком оптимального (в векторном смысле) состояния электротехнической системы переменного тока. Однако для корректного и тем более формального использования принципа Г.Герца в теории параметрического синтеза ЭЦ необходимы дополнительные знания, в первую очередь, геометрии (нормы, метрики, меры и т.д.) пространства, в котором осуществляется движение оптимизируемых параметров ЭЦ и формы конкретного инварианта, относительно которого сохраняется тождественность преобразований составляющих вектора целевой функции.

Современная философия (В.П.Визгин, О.С.Разумовский, В.С.Тюхтин, Е.Вигнер и др.) обобщает системные модели движения на основе принципов симметрии, сохранения и экстремальности (рис.1). Проведенные в работе исследования общих свойств симметрии (работы П.Кюри, А.А.Горева, А.В.Шубникова), сохранения (Р.Майер, Г.Гельмгольц, М.Планк) и экстремальности (Ж.Плато, М.Тевенин, К.М.Поливанов), присущих разнообразным формам поверхностей движения в евклидовом пространстве, позволили установить, что множеству переменных состояния линейной ЭЦ присуща цилиндрическая (круговая и винтовая) группа симметрии, а численные значения сосредоточенных параметров этой цепи определяются в основном "кинематическими" характеристиками электромагнитного процесса, а не инерционными свойствами носителей заряда (электронов). Отметим, что под симметрией цепей, полей, свойств и явлений в данной работе, как и обычно, понимают симметрию их геометрических (кинематических) моделей. При этом симметрия электрического поля отождествляется с симметрией полярного вектора, а симметрия магнитного поля - с симметрией аксиального вектора. В более широком смысле симметрия представляет собой инвариантность тех или иных уравнений по отношению к определенным преобразованиям (Е.Вигнер). Так, в соответствии с принципом П.Кюри группа симметрии электромагнитного поля получается объединением асимметрий векторов электрического и магнитного полей и характеризуется асимметрией "кручения, так как подвижное тело, которое поворачивалось бы вокруг оси и в то же время перемещалось бы параллельно оси, описывало бы винтовую линию".

На основе принципа симметрии А.В.Шубникова - П.Кюри в работе построена обобщенная "кинематическая" модель R, G, L, C - элементов линейной ЭЦ в виде идеального механического волчка, вращающегося вок-

руг неподвижной оси (симметрия конуса). В отличие от известных аналогов электромеханики (Д.Уайт, Г.Вудсон, Г.Кениг, В.Блекуэлл, А.Ленк, Л.А.Синицкий, В.В.Чкалов и др.), устанавливающих соответствие между подобными (изоморфными) элементами разнородных электрической и механической подсистем, "кинематическая" аналогия в виде механического волчка ("кинематическая" модель табл. I) отображает соответствие между параметрами единой МКА- модели и конститутивными законами разнородных элементов ЭЦ, т.е. устанавливает долю общего (меры) между этими элементами с точки зрения кинематики электромагнитных процессов.

Таблица I

"Кинематическая модель"	Индуктивный элемент	Емкостный элемент
Угол поворота $\vec{\varphi} = \varphi \vec{t}$	Заряд $q_L$	Заряд $q_C$
Радиус кривизны $\vec{\rho} = \rho \vec{n}$	Индуктивность $L$	Эластанс $1/C$
Угловая скорость $\vec{\omega} = (d\varphi/dt) \vec{b}$	Ток $i_L = dq_L/dt$	Ток $i_C = dq_C/dt$
Длина дуги $\vec{l} = \rho \vec{\omega} = \rho \dot{\varphi} \vec{t}$	- $Lq_L$	Напряжение $u_C = q_C/C$
Линейная скорость $\vec{v} = \frac{dl}{dt} \vec{t} = \rho \frac{d\varphi}{dt} \vec{t}$	Потокосцепление самоиндукции $\Phi_L = Lq_L/dt$	Скорость изменения напряжения $\frac{1}{C} dq_C/dt$
Касательное ускорения $\vec{\omega}_\tau = \rho \frac{d^2\varphi}{dt^2} \vec{t}$	Напряжение $u_L = L \frac{d^2q_L}{dt^2}$	Скорость изменения тока $\frac{1}{C} d^2q_C/dt^2$
Нормальное ускорение $\vec{\omega}_n = \frac{v^2}{\rho} \vec{n} = \rho \omega^2 \vec{n}$	Энергия $2 W_L = L i_L^2$	— $i_C^2 / C$
Статический момент $M_\varphi = \frac{1}{2} (\vec{l} \cdot \vec{\varphi}) = \frac{\rho}{2} \varphi^2$	— $\frac{1}{2} L q_L^2$	Энергия $W_C = C \frac{u_C^2}{2} = \frac{1}{2} \frac{q_C^2}{C}$

Здесь  $\vec{t}(t)$ ,  $\vec{n}(t)$ ,  $\vec{b}(t)$  - правая система трех ортов (касательной, главной нормали и бинормали) сопровождающего трехгранника.

Понятие меры движения является базовой величиной геометрии любого пространства, на основе которой увязываются в единое целое характеристики движения всех его разнородных элементов и параметров (В.С.Зорокин, А.Н.Милах, А.К.Шидловский, М.А.Айзерман). В то же время

современная теория ЭЦ, определяя понятие "энергии", рассматривает процессы ее накопления в электрической системе путем суммирования бесконечно малых приращений зарядов (токов) за бесконечно длительный промежуток времени, т.е., по существу, "игнорирует" движение, считая его скорость пренебрежимо малой. Это приводит к тому, что понятие "движение" в статической ЭЦ остается не определенным так же, как и система отсчета, относительно которой это движение должно быть описано. Соответственно не систематизированы свойства и закономерности движения, происходящего в ЭЦ.

*Определение:* под движением в статической ЭЦ будем понимать изменение ее электромагнитного состояния, определяемое мерой движения в виде скалярной функции состояния  $W(\vec{u}, \vec{I})$  и "скоростью" движения в виде векторной величины  $\Omega = \Omega(\vec{u}, \vec{I})$  относительно системы отсчета, образованной двумя взаимообусловленными ортогональными подпространствами вектор-функций тока  $\vec{I}$  и напряжения  $\vec{u}$ .

Используя аналогию между уравнениями движения идеального механического волчка с закрепленной осью вращения и уравнениями связи переменных состояния для линейных участков вольт-амперных характеристик  $R, G, L, C$  - элементов (отдельные результаты, показывающие сопоставимые величины модели,  $L$  и  $C$  элементов цепи, приведены в табл. I), в работе получено уравнение меры движения в ЭЦ

$$\frac{\partial^2 W |\Omega|}{\partial \vec{u} \partial \vec{I}} = \frac{\vec{u} \vec{I}}{|\Omega|^2} \left[ \frac{\partial^2 W}{\partial |\Omega|^2} - \frac{1}{|\Omega|} \frac{\partial W}{\partial |\Omega|} \right] = 0. \quad (I)$$

В координатах переменных состояния цепи уравнение (I) распадается на две независимые (ортогональные) системы уравнений, решения которых (мера движения) имеют вид энергетических функций

$$W_1 = \rho_1 I^2 / 2, \quad W_2 = \rho_2 u^2 / 2, \quad (2)$$

где постоянные  $\rho_1 = (R, L)$ ,  $\rho_2 = (G, C)$  характеризуют "искривление" (кривизну) электрокинематического процесса (см. табл. I). Единица меры движения (в математике - норма) определяется при условии  $\rho_1, \rho_2 = 1$ , когда на зажимах элементов действуют напряжения  $u_k$  (или протекают через зажимы токи  $i_k$ ):  $|W| = \frac{1}{2} \sum_k \left[ |u_k|^2 + |i_k|^2 \right]. \quad (3)$

При этом нормы сигналов напряжения и тока принимают следующий вид:

$$|u_k| = \left[ \int_{-\infty}^{\infty} u_k^2 dt \right]^{1/2}, \quad |i_k| = \left[ \int_{-\infty}^{\infty} i_k^2 dt \right]^{1/2},$$

где  $k$  перечисляет элементы ЭЦ. Норма может вводиться различными способами, однако полученная ее величина пропорциональна среднеквадратичному значению (евклидова норма), следовательно пространство переменных состояния ЭЦ вне (на) зажимах ее элементов - евклидово

пространство.

Более полный анализ выражений (I) - (3) позволяет установить, что мера электромагнитного процесса в евклидовом пространстве ЭЦ, а также любая энергетическая оценка этого движения, не отрицающая норму (3), должны обладать следующими свойствами: относительности мер одного и того же процесса в разных инерциальных системах отсчета, изотропности вида функции  $W(\Omega)$  во всех инерциальных системах отсчета, аддитивности мер всех составляющих элементов, инвариантности меры по отношению к повороту системы отсчета, сохранения меры движения в замкнутой системе, ортогональности составляющих  $\vec{u}, \vec{I}$  вектора скорости.

Совокупность приведенных свойств является фундаментальной и, поэтому в дальнейшем будет служить классификационной нормой соответствия существующих критериев качества (эффективности, полезности и т.д.) процессов в ЭЦ норме евклидова пространства.

Анализ свойств симметрии, сохранения и экстремальности евклидова пространства, определяемых уравнением (I), однозначно показывает, что форма поверхности свободного "движения" переменных состояния линейной ЭЦ адекватно отображается одним параметром - кривизной, которая удовлетворяет всем вышеперечисленным свойствам меры движения при условии, что

$$\vec{K}_b = \text{const} \text{ или } \partial \vec{K}_b / \partial \varphi = 0, \quad (4),$$

где  $\vec{K}_b$  - вектор кривизны траектории (поверхности) движения. В рамках ограничений МКА этот вывод согласуется с принципом экстремальности Ж.Плато, который утверждает, что поверхность свободного движения в центросимметричном евклидовом пространстве должна обладать постоянной кривизной. В работе показано, что эта аналогия справедлива, поскольку группа симметрии дифференциального уравнения линий постоянной кривизны  $k_b = \text{const}$  в полярной системе координат  $(\rho, \varphi)$  удовлетворяет цилиндрической группе симметрии векторов электромагнитного поля. Имеем

$$\rho \frac{d^2 \rho}{d\varphi^2} - 2 \left( \frac{d\rho}{d\varphi} \right)^2 + k_b \left[ \rho^2 + \left( \frac{d\rho}{d\varphi} \right)^2 \right]^{3/2} - \rho^2 = 0. \quad (5)$$

При  $\rho = \text{const}$  траектория движения радиус-вектора  $\rho(\varphi)$  представляет собой окружность, которая в полярной системе координат отображает постоянные токи и напряжения  $u(t) = \text{const}$ ,  $i(t) = \text{const}$ . Отсюда следует, что система постоянных токов и напряжений, образующая минимальную "поверхность" пространства переменных состояния ЭЦ, является системой с экстремальной "формой" поверхности. Как известно из работ Ж.Плато, Дао Чонг Тхи и А.Т.Фоменко, Л.С.Полака, такая форма обладает наимень-

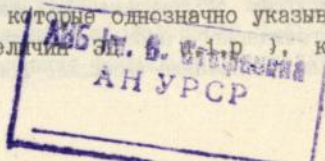
шим совокупным "действием", что обеспечивает ей самые благоприятные с энергетической точки зрения условия существования в евклидовом пространстве ЭЦ.

Общее решение уравнения (5) содержит кривую постоянной нулевой кривизны, которая противоречит евклидову пространству ЭЦ, и кривую постоянной положительной кривизны, которая определяет синусоидальную форму траектории движения. Полученные решения представляют собой полную систему допустимых в евклидовом пространстве линейной ЭЦ траекторий движения постоянной кривизны, поскольку сфера является единственно возможной поверхностью постоянной положительной кривизны в классе гладких замкнутых поверхностей.

Более полный анализ уравнения (5) показал, что среди широкого класса бесконечных систем ортогональных функций гармонический ряд Ж.Фурье, выраженный посредством аналитических функций, является единственным, а следовательно, - экстремальным (оптимальным) представлением, однозначно соответствующим всем перечисленным свойствам меры движения в евклидовом пространстве линейной ЭЦ.

В третьей главе определяются составляющие "кинематической" скорости изменения энергии (мгновенной мощности) в силовой кусочно-линейной ЭЦ АИ с учётом несинусоидальности форм кривых напряжений и токов. Практическая целесообразность определения таких составляющих обуславливается тем, что с точки зрения эффективности совершения полезной работы целевые функции параметрического синтеза АИ должны учитывать не только кривизну отдельных кривых тока и напряжения, но и энергетические характеристики их взаимодействия, отображаемые в рамках МКА нарушениями симметрии подобия между несинусоидальными формами кривых тока и напряжения, сдвигами и повсротеми их осей и центров симметрии.

Предлагаемый подход к определению составляющих скорости (мощности) основан на работах К.Будяну, С.Фризе, Г.Е.Пухова, И.М.Чиженко, О.А.Маевского, Г.С.Зиновьева и базируется на интерпретации свойств симметрии кривых тока и напряжения как законов баланса квазимощности ЭЦ, что позволяет установить однозначную, физически прозрачную взаимосвязь свойств симметрии с законами формирования и компенсации активных и неактивных составляющих мощности. Из работ Г.Крона известно, что знания (измерения) только двух переменных ( $u, i$ ) недостаточно для решения проблемы инвариантов мощности в ЭЦ. Это подтверждают и свойства меры движения, которые однозначно указывают, что исходное множество мгновенных величин ЭЦ (в частности, кроме



скалярной  $p = (\vec{u} \cdot \vec{I})$ , должно содержать еще и векторную сохраняющуюся величину. Проведенный на основе принципа симметрии А.В.Шубникова - П.Кюри анализ показал, что общепринятое уравнение энергетического баланса  $\oint \vec{H} \cdot d\vec{S} = \oint (\vec{E} * \vec{H}) \cdot d\vec{S} = (\vec{u} \cdot \vec{I})$ , где  $\vec{H}$  - вектор Дж.Пойнтинга, не является полным, поскольку система полярного ( $\vec{E}$ ) и аксиального ( $\vec{H}$ ) векторов заменяется скалярной величиной, образованной двумя полярными векторами  $(\vec{u}, \vec{I})$ . Это приводит к тому, что переменные состояния ЭЦ не различают правовинтовую и левовинтовую системы векторов  $(\vec{E}, \vec{H}, \vec{H})$  и, как следствие, неоднозначным образом определяют неактивные составляющие мощности. Установлено, что в сечении ЭЦ системы векторов  $(\vec{E}, \vec{H}, \vec{H})$  электромагнитного поля генератора и потребителя энергии связаны между собой посредством прямоугловского (ортогонального) зеркального преобразования, которое представляет собой сумму двух операций зеркального отображения. Являясь унитарным, такое преобразование сохраняет взаимную ортогональность и величины (нормы) исходных векторов. В работе показано, что свойствам ортогонально-зеркальной симметрии удовлетворяют линейные (унитарные) операторы Г.Кирхгофа, в первую очередь операторы Д.Гильберта, приведенного дифференцирования  $D(\cdot) = \sum_H d(\cdot) / (\rho \omega dt)$  и приведенного интегрирования  $T(\cdot) = \sum_H \rho \omega \int (\cdot) dt$ , представленные в виде функций аналитического сигнала. В этом случае множество мгновенных величин  $(u, u^*, i, i^*, p, p^*)$  является полным и однозначно списывает состояние энергетического процесса в ЭЦ с учетом скалярного и векторного законов сохранения аналитической функции мгновенной квазимощности:  $p_g = p + j p^*$

$$= \frac{1}{2} \left\{ \left[ \vec{u}_g \cdot \vec{I}_g \right] + \left[ \vec{u}_g^* \cdot \vec{I}_g \right] \right\} + \frac{1}{2} \left\{ \left[ \vec{u}_g^* \cdot \vec{I}_g \right] + \left[ \vec{u}_g \cdot \vec{I}_g \right] \right\}, \quad (6)$$

где действительная часть аналитической функции  $p_g$  лежит в соприкасающейся, а ее мнимая часть - в ортогональных плоскостях сопровождающего трехгранника; последняя по аналогии с вектором Дж.Пойнтинга несет информацию о направленности энергетического процесса в ЭЦ. Здесь  $\vec{I}_g = 1 + j1^*$ ,  $\vec{u}_g = u + ju^*$ , где знак \* справа от переменной обозначает ортогонально-зеркальное преобразование, а сверху - комплексно-сопряженную функцию.

На основе полученного уравнения баланса (6) в работе доказаны теорема однозначности множеств квазимощностей и операторов Г.Кирхгофа и теорема разложения аналитической функции состояния энергетического процесса на две составляющие - нормальную и спрямляющую аналитические функции. Показано, что средние значения активной и

реактивной частей нормальной аналитической функции мгновенной мощности определяют величину совершенной работы или работы, которая может быть совершена при определенных условиях, активная и реактивная части спрямляющей аналитической функции средних значений не имеют, т.е. работы совершить не могут, и характеризуют пульсационность и колебательность энергетического процесса. Получены прямые определения активной, реактивной и комплексной полной мощностей, которые связаны между собой в квадратуре, причем впервые реактивная мощность сдвига определена как среднинеинтегральная характеристика функции состояния ЭЦ

$$Q = \frac{1}{2T} \int_0^T (iu^* - ui^*) dt = \sum_{k=1} U_k I_{k1} \sin(\alpha_k - \beta_1). \quad (7)$$

Практическая реализация указанных теорем осуществлена путем построения новых, более эффективных способов, алгоритмов и устройств минимизации (компенсации) неактивных составляющих мощности. Доказано, что в любом произвольно выбранном сечении ЭЦ необходимым и достаточным условиями минимизации неактивных составляющих полной мощности является стремление к нулю реактивной части подынтегральной функции (7), когда  $p_{nq} = ui^* - iu^* = \min$ . Доказаны три теоремы формализации управляющего параметра по току (напряжению), отличающиеся различной степенью общности. В том числе: минимизация обратных потоков энергии и неактивных составляющих мощности в сечении ЭЦ между источником энергии, работающим в режиме источника ЭДС (тока) произвольной формы, и линейным неискажающим потребителем адекватна минимизации реактивных составляющих всех гармоник тока (напряжения), что схемотехнически реализуется суммированием в узле (контуре) потребляемого от источника тока (напряжения) и тока (напряжения) управления  $i_y(t) = \sum_{k=1} u_k^*(t) p_{nq1} / |u_{sk}|$ , (8)

генерируемого устройством компенсации, работающим в режиме источника тока (ЭДС). Определены предельные уровни потребления от источника энергии активной и реактивной мощностей, а также доля этого потребления компенсатором для поперечной компенсации по току и продольной компенсации по напряжению, приведены зависимости коэффициента использования проходной мощности, коэффициента мощности, коэффициентов формы и искажения от  $\cos \varphi_n$ . Показано, что способ управления (8) увеличивает содержание первой гармоники тока, понижает "ос.роту" формы тока при доминировании индуктивной и повышает - при доминировании активной составляющей сопротивления нагрузки, улучшает гармонический состав кривой тока. Результаты проведенных исследований подтверждают практическую целесообразность использования формальных процедур мини-

мизации обратных потоков энергии и неактивных составляющих полной мощности в качестве целевых функций параметрического синтеза АИ. Схемотехнические решения способов и устройств компенсации защищены авторскими свидетельствами на изобретения.

Четвертая глава посвящена решению задачи определения экстремальных направлений "движения" параметров целевых функций и переменных состояния ЭЦ АИ, что позволяет выделять среди возможных направления наискорейшего возрастания функций и тем самым существенно повышать быстродействие и эффективность алгоритмов синтеза оптимальных (или компенсации нежелательных) параметров или свойств АИ. С математической точки зрения такая задача формулируется как определение чувствительности ЭЦ по параметрам и начальным условиям.

Классические методы определения чувствительности, основанные на решении уравнений в вариациях, из-за громоздких вычислений, существенно превышающих на начальных этапах работы алгоритма аналогичные затраты на поисковые процедуры, оказались мало пригодными для задач параметрического синтеза кусочно-линейных систем дифференциальных уравнений ЭЦ АИ, имеющих разрывы и изломы траекторий "движения" переменных состояния  $x(t)$  и целевых функций  $CF(x(t))$ . В результате в преобразовательной технике точные значения экстремальных (предельных) характеристик движения практически не определялись, что не могло не сказаться и на эффективности предлагаемых решений.

Трудности заключаются в том, что для каждой переменной состояния и для каждого параметра АИ, в явном или косвенном виде входящем в целевую функцию, необходимо определить зависимость от начальных значений и всех других параметров, причем в условиях недифференцируемости в отдельных точках, число которых превышает десятки единиц. "Кинематическая" модель направленности движения, построенная по принципу обратных задач на основе метода сопряженных уравнений с обратным ходом времени, используя свойства экстремальности, симметрии и сохранения переменных состояния ЭЦ АИ, позволила преодолеть указанные трудности для задач системного параметрического синтеза кусочно-линейных ЭЦ АИ.

В работе рассмотрены исходные теоретические предпосылки и теоремы системного подхода, изложенные в работах М.Л.Быховского, Б.Н.Пшеничного, И.П.Ченцова, Е.Н.Розенвассера и др., обоснован энергетический инвариант, относительно которого сохраняется тождественность преобразований в ЭЦ АИ, проведен сопоставительный анализ классического и предлагаемого подходов к определению чувствительности

ЭЦ, получены основные соотношения для систем с изломами и скачками траекторий движения. Впервые в преобразовательной технике решена задача определения чувствительности для недифференцируемых в отдельных точках целевых функций АИ.

Пусть задано  $k$  временных непересекающихся интервалов времени  $\tau^s = t_s - t^{(s)}$ ,  $s = \overline{1, k}$ , где на каждом интервале движение переменных состояния ЭЦ АИ описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений  $\dot{x} = f(x, t)$ , представленных в нормальной форме О.Коши. В качестве варьируемых параметров рассмотрим  $\tau^s$  и  $x^{(0)}$ . Здесь верхний индекс обозначает номер интервала, а взятый в скобки - начальное значение переменной на этом интервале, имеем:

$$x^s(\tau^s, \tau^{s-1}, \dots, \tau^1, x^{(0)}) = x^s(\tau^s, x^{(s)}(\tau^{s-1}, \dots, \tau^1, x^{(0)})), \quad (9)$$

$$t_s = \sum_{j=1}^s \tau^j = \tau^1 + \tau^2 + \dots + \tau^s, \quad t^{(0)} = 0, \quad t_s = t_{s-1} + \tau^s.$$

Запишем целевую функцию АИ в виде

$$CF(\tau^1, \dots, \tau^k, x^{(0)}) = \sum_{s=1}^k CF^s(x(t_s), \tau^1, \dots, \tau^k, x^{(0)}). \quad (10)$$

Согласно определению почти-градиента, введенного Н.З.Шором, по правилам дифференцирования сложных функций получаем:

$$g_{\tau^s}^{(CF^s)}(\tau, x^{(0)}) = \sum_{j=1}^k g_{\tau^j}^{CF^j}(x^j) \frac{dx^j(t_j)}{d\tau^s},$$

$$g_{x^s}^{(CF^s)}(\tau, x^{(0)}) = \sum_{s=1}^k g_{x^s}^{CF^s}(x^s) \frac{dx^s(t_s)}{dx_j^{(0)}}. \quad (11)$$

где вместо обычной производной стоит почти-градиент  $g_{x^s}^{CF^s}(x^s)$  функции  $CF^s$  в точке  $x^s = x(t_s)$ , поскольку условия (10) делают целевую функцию недифференцируемой.

Используя основные свойства систем сопряженных (присоединенных) уравнений, конкретизируем формулы для почти-градиентов (11). С этой целью зададим решение  $\varphi^k(t)$  системы сопряженных уравнений, удовлетворяющее следующему конечному условию

$$\varphi^k(t_k) = g_{F^k}(x^k), \quad \dot{\varphi}^k = -\varphi^k \Gamma^k(x)(t, x(t)), \quad (12)$$

где  $\Gamma^k(x)$  - частная производная по  $x$  на  $k$ -м интервале.

Тогда

$$\varphi^k(t_k) B^{k,k} = g_{F^k}(x^k) B^{k,k} = \text{const} = \varphi^k(t_{k-1}) \delta = \varphi^k(t_{k-1}),$$

т.к.  $B^{k,k}(t_{k-1}, t_{k-1}) = \delta$ , где  $B^{k,k}$  является решением системы уравнений в вариациях относительно начальных значений,  $\delta$  - единичная матрица.

На  $(k-1)$ -м интервале добавляется влияние функции  $\mathcal{E}_F^{k-1}(x^{k-1})$ . Поэтому конечное условие сопряжения в момент времени  $t_{k-1}$  примет вид

$$\varphi^{k-1}(t_{k-1}) = \varphi^k(t_{k-1}) + \mathcal{E}_{F^{k-1}}(x(t_{k-1})),$$

$$\dot{\varphi}^{k-1} = -\varphi^{k-1} \Gamma^{k-1}(x)(t, (t_{k-1})).$$

Действуя по индукции, окончательно получим

$$\mathcal{E}_F^{(x^0)}(\tau, x^{(0)}) = \varphi^1(t_0). \quad (14)$$

Аналогично определяем производную по  $\tau^j$ ,  $j = \overline{1, k}$ . Двигаясь в обратном направлении, имеем

$$\mathcal{E}_F^{(\tau^j)} = \sum_{s=j}^k \mathcal{E}_{F^s}(x(t_s)) \Gamma^s(t_s) + \sum_{j=1}^{k-1} \varphi^{s+1}(t_s) \Delta^s \Gamma, \quad (15)$$

где  $\Delta^s \Gamma = \Gamma^s(t_s) - \Gamma^{s+1}(t_s)$ .

Алгоритм вычисления производных (II) по формулам (14) и (15) работает следующим образом. Задаем  $\varphi^{s+1}(t_s)$ ,  $\mathcal{E}_F^{(\tau^k)}$ ,  $\mathcal{E}_F^{(\tau^{k-1})}$ , ...,  $\mathcal{E}_F^{(\tau^s)}$ . На первом шаге рассчитываем  $\varphi^s(t_s) = \varphi^{s+1}(t_s) + \mathcal{E}_{F^s}(x^s)$ . На втором - дифференцируем сопряженную систему уравнений на  $s$ -м интервале. Получаем  $\varphi^s(t)$ . На третьем шаге вычисляем  $\mathcal{E}_F^{(\tau^{s-1})}$  по формуле  $\mathcal{E}_F^{(\tau^{s-1})} = \mathcal{E}_F^{(\tau^s)} + \mathcal{E}_{F^{s-1}}(x(t_{s-1})) \Gamma^{s-1}(t_{s-1}) + \varphi^s(t_{s-1}) \Delta^{s-1} \Gamma$ . Шаг четвертый  $s := s-1$ . Если  $s=1$ , то выходим из процедуры, иначе идем на шаг I. Производную  $\mathcal{E}_F^{(x^0)}$  определяем по формуле (14). В результате имеем почти-градиенты, которые применяются на конечных этапах решения задачи параметрического синтеза ЭЦ АИ обобщенными градиентными методами минимизации недифференцируемых целевых функций АИ, в частности RALG - алгоритмом минимизации на основе операции растяжения пространства в направлении разности двух последовательных почти-градиентов. Использование почти-градиентов в условиях скачкообразного изменения параметров и переменных состояния ЭЦ АИ позволило существенно (в 2-3 раза) повысить скорость, надежность и точность определения экстремума целевых функций преобразователей.

В пятой главе рассмотрены системные модели и алгоритмы оптимального параметрического синтеза кривых напряжения или тока квазисинусоидальной формы. Показано, что существующие модели синтеза формы кривой напряжения или тока мало пригодны при системной постановке задачи ввиду необходимости обобщения чрезвычайно большого числа разнообразных параметров и критериев качества, определяемых существующим разнообразием средств и технических путей реализации известных способов синтеза. Более рациональным является использование единого (системного) параметра - кривизны ( $k_b$ ) траектории движения вектор-функции напряжения, стабилизация которого ( $\partial k_b / \partial \varphi = \min$ )

приближает форму траектории к оптимальной (принцип оптимальности) с точки зрения свойств евклидова пространства (здесь и далее  $\rho$ ,  $\varphi$  - полярные координаты изображающей точки). Используя уравнение (5), формализуем принцип оптимальности (4) в виде

$$\rho \left[ \frac{\partial^3 \rho}{\partial \varphi^3} + \frac{\partial \rho}{\partial \varphi} \right] \left[ \rho^2 + \left( \frac{\partial \rho}{\partial \varphi} \right)^2 \right] + 3\rho \left( \frac{\partial \rho}{\partial \varphi} \right)^3 - \quad (16)$$

$$- 3 \frac{\partial^2 \rho}{\partial \varphi^2} \frac{\partial \rho}{\partial \varphi} \left[ \rho^2 - \left( \frac{\partial \rho}{\partial \varphi} \right)^2 + \rho \frac{\partial^2 \rho}{\partial \varphi^2} \right] = \min.$$

Разосъем пространство (плоскость), окружающее начальную точку движения, на  $n$  телесных углов  $\varphi_j$ ,  $j = \overline{1, n}$ . Тогда в соответствии с известными из механики выражениями вектор  $\vec{a}_s = \sum_j m_j \vec{\rho}_j / \sum_j m_j$  будет определять центр симметрии кривой напряжения или тока. Если принять, что  $\varphi_j = 2\pi/n$ , то координаты центра симметрии:  $a_{sx} = \frac{1}{n} \sum_j \rho_j \cos \varphi_j$ ;  $a_{sy} = \frac{1}{n} \sum_j \rho_j \sin \varphi_j$  будут совпадать с амплитудой "основной гармоники" траектории движения.

Установлено, что амплитуда и фаза "первой гармоники" траектории движения в полярной системе координат по своему кинематическому содержанию определяют радиус-вектор, проведенный в центр симметрии ("тяжести", "инерции", "масс") кривой напряжения или тока, который имеет физический смысл и наглядное представление не только для одномерных, но и для многомерных объектов и явлений. Это свойство позволяет уточнить физическое содержание принципа оптимальности (16), при котором симметричная траектория движения обладает максимальным полезным "действием".

Установлено, что параметры  $\rho_j$ ,  $\varphi_j$  ступеней (импульсов) квазисинусоидального напряжения (тока) оптимальной формы стремятся к предельным значениям, определяемым сферической формой. Для примера на рис.2 показаны оптимальные формы трехступенчатых кривых, синтезированных тремя известными способами: 1) по синусоидальной функции построения; 2) исключением ряда гармоник, близлежащих к основной; 3) минимизацией коэффициента гармоник (В.Е.Тонкаль, К.А.Липковский, В.И.Сенько, Г.С.Мыцк и др.), где площадь, выступающая за оптимальную сферическую форму, заштрихована. На рис.3 приведены результаты исследования относительных отклонений  $\delta(\eta)$  основных параметров многоступенчатых ( $m = 1,5$ ) кривых, синтезированных способом 3, где  $\eta = 0,1$ . Параметры вычислялись по формулам:

$$|\rho| = \left[ \sum_j 2\rho_j^2 (\varphi_{j+1} - \varphi_j) \right]^{1/2}; \quad |a_s| = 2 \sqrt{2/\pi} \sum_j \rho_j (\cos \varphi_j - \cos \varphi_{j+1});$$

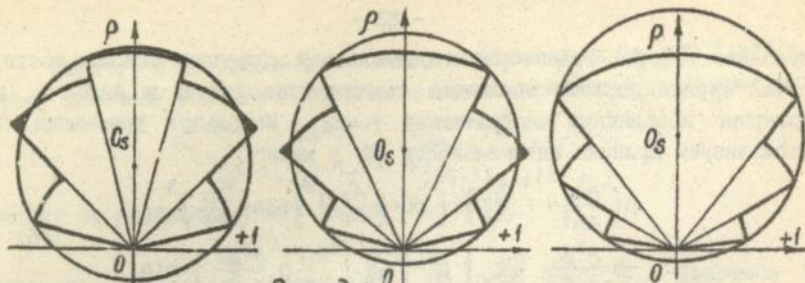


Рис. 2

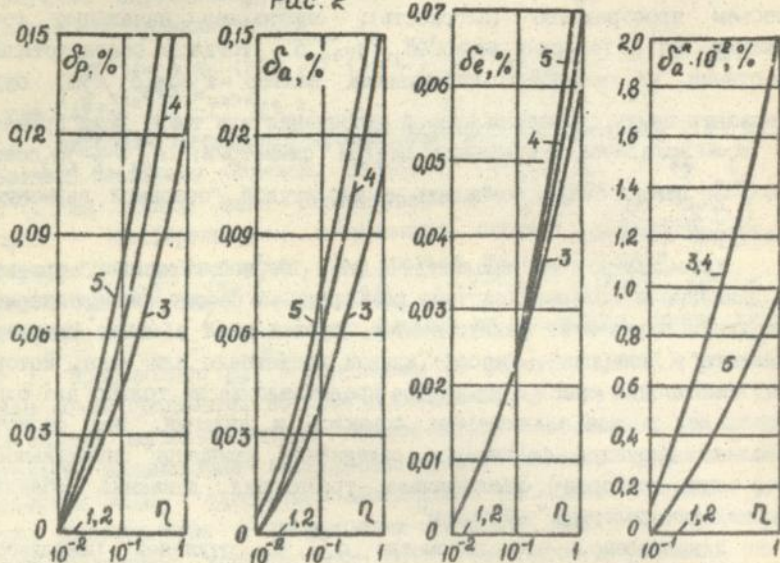


Рис. 3

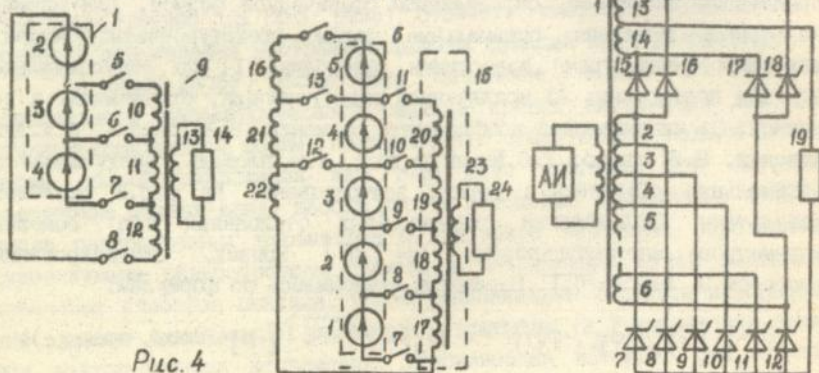


Рис. 4

$$||=2/\pi \left[ \sum_j \rho_j (\varphi_{j+1} - \varphi_j) + |\rho_j - \rho_{j-1}| \right]; a_s^* = |\rho| / |a_s|.$$

Видно, что отклонения от сферической формы не превышают 0,02-0,2%. При этом системная целевая функция параметрического синтеза имеет

$$\text{вид } \frac{|\rho_s|^2}{|a_{ss}|} + \eta \left[ \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{|\rho_j|^2}{|a_{sj}|} - \left( \sum_{j=1}^m \frac{|\rho_j|^2}{|a_{sj}|} \right)^{1/m} \right] = \min. \quad (17)$$

Задача синтеза (17) решалась в полной (системной) постановке, т.е. вначале осуществлялся равномерный "просмотр" заданной области методом глобального случайного поиска (10000 точек), затем алгоритм переключался на прямые (поисковые) методы Р.Хука - Т.Дживса или Дж.Нелдера - Р.Мида, а окончательное уточнение осуществлялось почти-градиентным методом Н.З.Шора, что позволило получить решение с высокой точностью (до 7 знака) и за приемлемое время.

Показано, что принцип оптимальности (принцип пространственно-временного симметрирования) является достаточно общим и охватывает собой не только формы кривых напряжения и тока, но и структуру и режимы работы АИ. В частности, показано, что имеющая место асимметрия отдельных схемных решений в обязательном порядке компенсируется диаметрально противоположным асимметричным режимом работы и наоборот. Для примера на рис.4 приведены три оригинальные схемы АИ с амплитудно-импульсной модуляцией выходного напряжения. Здесь модулятор расположен как на первичной, так и на вторичной сторонах трансформаторно-ключевой исполнительной структуры, что позволяет по сравнению с известными АИ получить на выходе большее число ступеней напряжения и тем самым повысить его качество.

Шестая глава посвящена разработке системных моделей и алгоритмов многокритериального параметрического синтеза АИ на основе принципов "самообучения". Показано, что наиболее эффективным при таком решении задач синтеза является подход, на начальных этапах которого применяют алгоритмы случайного поиска, по мере накопления информации проводят адаптацию этих алгоритмов к одному из детерминированных, а в процессе работы видоизменяют структуру алгоритма в зависимости от сложившейся ситуации. По результатам вычислительного эксперимента на многочисленных тестовых примерах и схемах АИ с удвоением частоты (рис.5), АИ тока и АИ напряжения установлено, что современные алгоритмы случайного поиска, впервые предложенные и разработанные У.Эшби, С.Бруксом, Л.А.Растригиным и др., обеспечивают практическую независимость потерь на поиск от начальных условий и не требуют предварительной настройки параметров

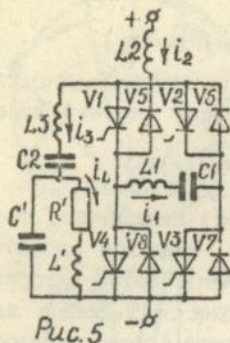


Рис. 5

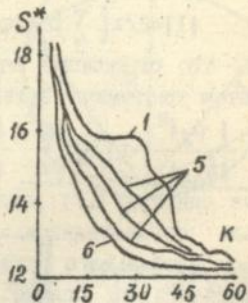
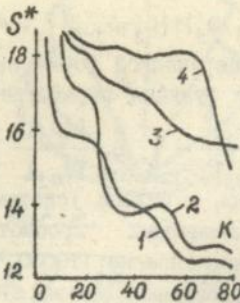


Рис. 6

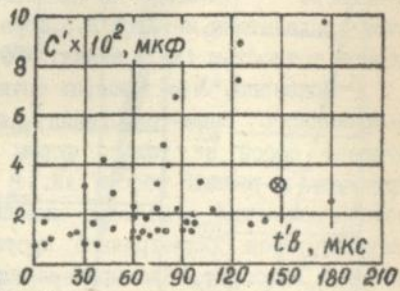
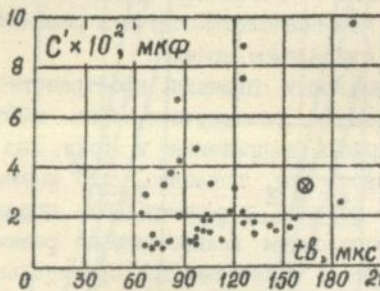


Рис. 7

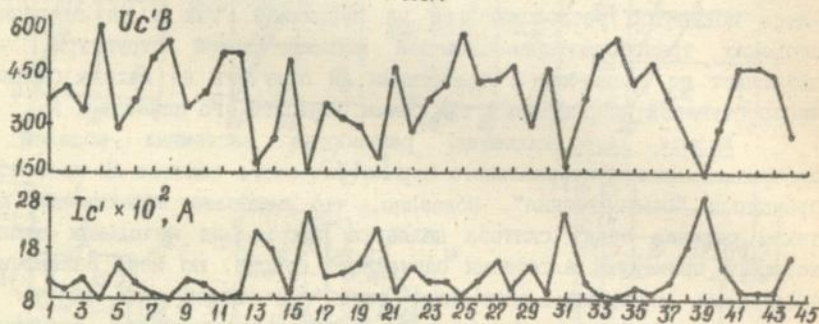


Рис. 8

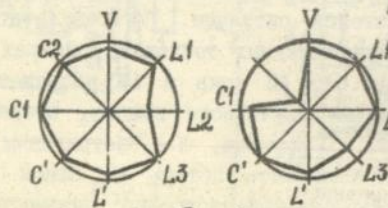


Рис. 9

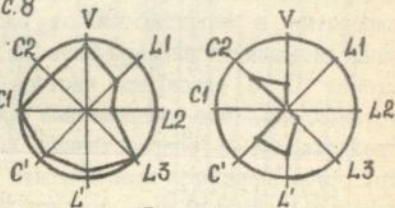


Рис. 10

алгоритма, что позволяет их использовать при решении задач параметрического синтеза АИ в условиях неполной информации об ограничениях и характере поведения целевой функции. Показано, что среди алгоритмов случайного поиска наиболее эффективными являются алгоритмы с самообучением, которые реализуют процедуру выбора направления рабочего шага на основе предложенной в работе статистической оценки "кинематической" меры движения. На рис.6 приведены результаты минимизации относительной установленной мощности  $S^*$  реактивных элементов АИ с удешевлением частоты алгоритмами случайного поиска: 1 - с изменением длины шага; 2 - с шагом, зависящим от направления; 3 - с наказанием случайностью; 4 - с возвратом; 5 - с запоминанием и обучением; 6 - с оригинальной процедурой обобщенного самообучения, где  $k$  - число вычислений целевой функции АИ.

Пусть  $\vec{x}^j$  - положение вектора параметров АИ в  $j$ -й точке, а  $\gamma_{ij}$  - угол между направлениями антиградиента и  $i$ -й пробы (из  $j$ -й точки) случайного вектора  $\vec{\phi}$ , равномерно распределенного во всех направлениях евклидова пространства и отображающего распределение "сил" в центральном поле. Тогда

$$\cos \gamma_{ij} = -(\text{grad} U^j, \Delta \vec{x}^j) / (|\text{grad} U^j| |\Delta \vec{x}^j|). \quad (18)$$

Усредняя для центральной "кинематической" модели результаты достаточно большого числа равномерно распределенных случайных проб, имеем

$$\lim_{n \rightarrow \infty} M^j \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos \gamma_{ij} \right] = 2/\pi, \quad -\pi/2 < \gamma_{ij} < \pi/2, \quad (19)$$

где  $M$  - математическое ожидание случайного шага.

Из двух последних выражений следует равенство, которое, являясь статистической оценкой градиента целевой функции за  $j$  шагов поиска, служит в качестве адаптирующегося вектора памяти  $\vec{N}_j$  алгоритма 6:  $\vec{N}_j = \frac{\pi}{2k} \sum_{j=1}^k \frac{\Delta U^j \Delta \vec{x}^j}{a_j^2}$ , где  $a_j = \frac{\Delta \vec{x}^j}{\cos \gamma_j}$ .

Показано, что формализацию процедуры принятия компромиссного решения в задаче параметрического синтеза АИ целесообразно проводить путем активного формирования компонент векторной целевой функции на основе общесистемного "кинематического" принципа оптимальности движения, который однозначно учитывает свойства симметрии, сохранения и экстремальности вектор-функций  $\vec{u}$ ,  $\vec{i}$  и выражается через единый "кинематический" параметр движения - кривизну  $k_b$ . Предложенный алгоритм многокритериального параметрического синтеза АИ работает следующим образом. На первом этапе проводится серия вычислительных экспериментов по стабилизации кривизны кривых тока, напряжения и мгновенной

мощности во всех элементах АИ, включая и нагрузку, ибо только совокупное множество этих величин полностью определяет состояние АИ. На втором этапе осуществляется построение границ отображения приближенной области компромиссов (которая включает в себя область В.Парето) на пространство показателей качества АИ путем заполнения таблиц испытаний кривизны кривых токов, напряжений и мощностей в элементах АИ, где 1-е строки ( $i = \overline{1, n}$ ) образуются из локальных показателей качества  $m$  элементов, полученных при оптимизации АИ по  $j$ -му показателю ( $j = \overline{1, p}$ ), а столбец представляет набор значений  $j$ -го показателя качества  $k$ -го элемента в точках оптимума по всем  $n$  локальным испытаниям рабочих режимов ("точек") АИ. На третьем этапе строится нормированное метрическое пространство показателей качества с интервалом измерения  $[0, 1]$  расстояний (метрикой), задаваемой характерной  $s$ -образной (эволюционной) кривой вида

$$\xi_{\Phi j}(k_{b_j}) = ((k_{b_j} - \hat{k}_{b_j}) / (\check{k}_{b_j} - \hat{k}_{b_j}))^{\lambda_j}, \quad (21)$$

где  $\lambda_j$  - показатель нелинейности;  $\check{k}_b$ ,  $\hat{k}_b$  - наилучшее и наихудшее значения  $k_b$ . На четвертом этапе включается в работу модель выбора, удовлетворяющая всем вышеперечисленным свойствам меры движения в евклидовом пространстве - структуре ЭЦ АИ:

$$\xi_s = \min \left[ \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (1 - \beta_j \xi_{\Phi j}^\gamma) \right]^{1/\gamma}, \quad (22)$$

где  $\beta_j$  - весовой коэффициент;  $\gamma$  - параметр, который при  $\gamma=1$  реализует модель абсолютной уступки, при  $\gamma=2$  - принцип оптимальности движения, а при  $\gamma=\infty$  - минимаксную модель. И, наконец, на пятом этапе осуществляется выбор гарантированного результата в виде приближенно сферических поверхностей:

$$\begin{aligned} \min(R_{i1}, R_{i2}, \dots, R_{im}) &> \min(R_{(i+1)1}, R_{(i+1)2}, \dots, R_{(i+1)m}) = \\ &\Rightarrow \min \left[ \sum_{k=1}^m R_{ik} \right] > \min \left[ \sum_{k=1}^m R_{(i+1)k} \right], \quad (23) \\ R = b, c, \quad b &= \left[ \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p \beta_j \xi_{\Phi j}^2 \right]^{1/2}, \quad c = \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p \beta_j \xi_{\Phi j}. \end{aligned}$$

Путем обобщения принципа оптимальности Г.Герца показана целесообразность общесистемной минимизации величины суммарных изменений "кинематической" формы движения в ЭЦ АИ относительно величины свободной (без принуждения) составляющей этого движения, определяемой уравнением (16). Имеем

$$CF_s \left( \frac{|F_{пр.1}|}{|F_{св.1}|}, \frac{|F_{пр.2}|}{|F_{св.2}|}, \dots, \frac{|F_{пр.p}|}{|F_{св.p}|} \right) = \min, \quad (24)$$

где  $F_{св}$ ,  $F_{пр}$  - свободная ("объективная") и принужденная ("субъектив-

ная") составляющие векторной целевой функции  $\mathcal{CF}_s$ . Установлено, что "кинематическая" форма свободного движения в евклидовом пространстве ЭЦ АИ однозначно определяется центром ее симметрии (постоянной составляющей и первой "гармоникой"). Обоснован и сформулирован принцип оптимальности движения переменных состояния в ЭЦ АИ: стратегия синтеза оптимальных параметров движения в ЭЦ АИ обладает тем свойством, что какова бы ни была "кинематическая" форма начального принужденного движения, последующие ее изменения должны минимизировать величину отношения норм радиус-вектора "кинематических" параметров принужденного движения к радиус-вектору, определяющему центр симметрии (радиус кривизны) параметров свободного движения.

В результате обобщенная целевая функция АИ принимает вид

$$\mathcal{CF}_s = \left( \left| \frac{u}{u_1} \right|, \left| \frac{1}{1_1} \right|, \left| \frac{u}{u_1} \right| \left| \frac{1}{1_1} \right|, \left\langle \frac{u}{|u|} \right\rangle, \left\langle \frac{1}{|1|} \right\rangle, \frac{\left| \frac{u}{u_1} \right| \left| \frac{1}{1_1} \right|}{\left\langle \frac{u}{|u|} \right\rangle}, \dots, \right. \\ \left. \frac{M}{P_{\Pi}}, \frac{V}{P_{\Pi}}, \frac{U}{P_{\Pi}}, \frac{S}{P_{\Pi}}, t_B, \dots \right) = \text{extr}, \quad (25)$$

где  $M$  - масса,  $V$  - объем,  $U$  - цена,  $S$  - установленная мощность,  $t_B$  - время, предоставляемое для восстановления управляющих свойств вентилей,  $P_{\Pi}$  - полезная составляющая;  $\langle \cdot \rangle$  - среднее значение функции;  $u_1, 1_1$  - первая гармоника  $u, 1$ .

Положительным свойством принципа оптимальности движения является то, что векторная задача параметрического синтеза (25) решается аналогично скалярной, т.е. путем компенсации нарушений симметрии (стабилизации кривизны по уравнению (16)) с тем принципиальным отличием, что компенсации будут подлежать нарушения, обусловленные взаимным влиянием компонент обеих групп целевой функции (25). Степень этого влияния учитывается на основе энергетических оценок (2), позволяющих суммировать среднеквадратичные отклонения кривизны траекторий движения вектор-функций от постоянной величины (4), выделяя те действия, которые обладают минимальной суммарной "энергией".

Показаны результаты многокритериального параметрического синтеза АИ мощностью 100 кВт, частотой 2,5 кГц, напряжением источника питания 500 В, схема которого приведена на рис.5. Вектор варьируемых параметров содержит 5 компонент  $X = (L_1^*, L_2^*, L_3^*, C_1^*, C_2^*)$ , вектор "кинематических" характеристик формы определяется десятью основными компонентами  $\Phi_0 = (|1|, \langle |1| \rangle, I_1, 1_{\max}, \frac{d1_{\max}}{dt}, |u|, \langle |u| \rangle, U_1, u_{\max}, \frac{du_{\max}}{dt})$ , а также пятью дополнительными компонентами полной мощности нагрузки  $\Phi_{\text{доп.н}} = (P_{\text{н}}, P_{1\text{н}}, D_{\text{н}}, P_{\text{н}}^F, S_{\text{н}})$ , где верхний индекс отмечает мощность С.Фризе, и двумя дополнительными

компонентами вентиляей  $\Phi_{\text{доп.в}} = (t'_в, t_в)$ , где  $t'_в$  - минимальное значение  $t_в$  в переходном режиме работы АИ. Целевая функция (25) вначале используется на уровне элементов, - имеем 960 локальных показателей качества и характеристик элементов АИ в виде тензора качества размерами 8 x 12 x 10. Указанные размеры не являются жесткими и могут варьироваться по любой из осей тензора, - предлагаемый алгоритм многокритериального синтеза при этом не изменится.

По итогам первой итерации работы алгоритма методом ЛП<sub>4</sub> - поиска просмотрены 200 равномерно распределенных пробных "точек", среди которых оказалось 44 рабочих режима, удовлетворяющих всем заданным параметрическим, функциональным и критериальным ограничениям. Принцип оптимальности движения выделил рабочий режим под номером 40. На рис.7 показано распределение множества рабочих режимов ("точек") АИ в сечениях  $C'(t'_в)$  и  $C'(t_в)$ , где 40-я точка обозначена звездочкой; выделяется область рабочих режимов, границы которой используются на второй итерации в качестве новых более жестких ограничений. На рис.8 приведены диаграммы действующих значений напряжения и тока конденсатора  $C'$  для всех 44 рабочих "точек", множество которых определяет "место" 40-го оптимального в векторном смысле решения по указанным критериям. На рис.9 показана симметрия наилучшего и наихудшего по массе АИ (32 и 16 рабочие режимы), а на рис.10 - то же по установленной мощности реактивных элементов АИ (режимы 32,4). Диаграммы подтверждают достоверность работы алгоритма, основанного на принципах симметрии, сохранения и экстремальности движения, и показывают имеющиеся резервы оптимизации по каждому из критериев качества (сравни с рис.2).

На второй итерации 40-му режиму был присвоен номер I и в его рабочей области, гиперобъем которой стал меньше в 500 тыс.раз, были просмотрены 100 "точек", среди которых рабочими оказались 62. Оптимальным признан режим 2, который одновременно является парето-оптимальным по целевой функции (25) относительно "точки" I. По сравнению с алгоритмом синтеза АИ по скалярному критерию  $S^*$  (рис.6) достигнуты следующие положительные результаты многокритериального синтеза: качественные показатели формы кривой напряжения (тока) во всех элементах АИ в среднем улучшены на 14%; время, предоставляемое для восстановления вентиляей, возросло в 2,4 раза; коэффициент мощности нагрузки стал выше на 1%; установленная мощность вентиляей - меньше на 2%; масса АИ - на 0,2% и только  $S^*$  возросла на 4,6%.

В седьмой главе исследуются принципиально новые свойства и

возможности АИ модуляционного типа, которые появляются в результате замены в звене переменного тока части полупроводниковых (ПП) ключевых элементов на сверхпроводниковые (СП) ключи-криотроны. На рис.11 приведена сообщенная структурная схема такого рода сверхпроводниковой преобразовательной системы (СПС), содержащей первичный источник электроэнергии (ПИЭ), ПП АИ модуляционного типа, токовводы (ТВ), СП преобразователь (СПП), СП магнитную систему (СПМС), систему управления (СУ) АИ, СУ СПП, систему измерения и защиты (СИЗ), устройство контроля и синхронизации (УКС). Специфика системы заключается в том, что часть ее силовых элементов выполнена из СП материалов и расположена в "холодной" (криогенной) зоне, а согласование параметров ПИЭ и нагрузки (СПМС) осуществляется при помощи "теплого" ПП АИ. Такое решение позволяет в дополнение к традиционным функциям полупроводниковой техники выполнять и сугубо специфические функции накопления и хранения электромагнитной энергии. При этом значительно (на несколько порядков) снижаются активные (омические) потери в СПП по сравнению с ПП преобразователями, особенно в режиме "замороженного" потока, где это уменьшение может составить величину порядка  $10^{10}$ - $10^{16}$ .

Путем обобщения работ И.А.Глебова, В.Е.Игнатьева, В.Н.Шахтарина, Т.Бухгольда, Л.Клундerta, Х.Кейта и др. выявлены новые возможности СПС, которые наиболее полно реализуются в звене переменного тока, когда связь между ПП АИ и СПП осуществляется при помощи согласующего СП трансформатора (СПТ). Последний в дополнение к своим традиционным функциям выполняет здесь роль эффективного согласующего элемента между температурными зонами. В результате существенно снижены энерго- и материалоемкости разрабатываемых преобразовательных устройств. Проведена классификация СПП, которая в отличие от существующих охватывает и многофазные преобразователи. На рис.12 приведены шесть из 18 структур СПП, вошедших в классификационную таблицу. На рис.13 показаны принципиальная электрическая схема и временные диаграммы работы третьей из представленных структур в режиме коммутации ЭДС. На рис.14 изображена схема трехфазного СПП, работающего в режиме накопителя энергии. Здесь ДТ - датчик тока, К - криотрон. Способы управления данными преобразователями являются оригинальными. На рис.15 представлена обобщенная схема силовых блоков СПП, где криотроны условно обозначены в виде наклонных перемычек, а система нагрузок - в виде резисторов. Отображенная посредством матрицы, учитывающей наличие ключей и "жестких" соединений, эта схема поз-

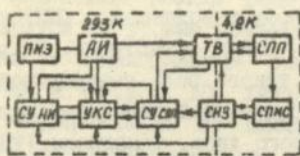


Рис. 11

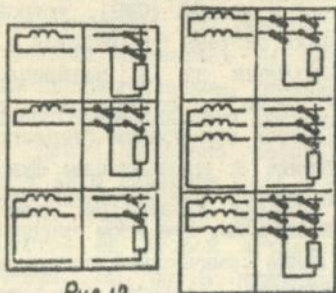
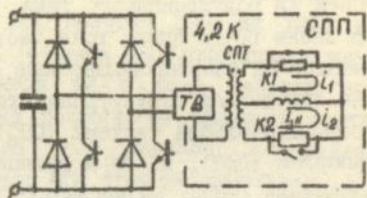


Рис. 12

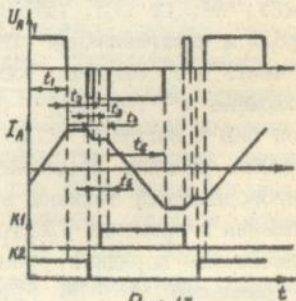


Рис. 13

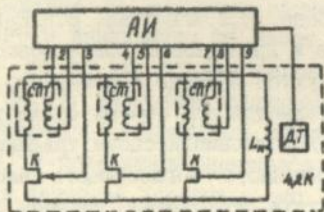


Рис. 14

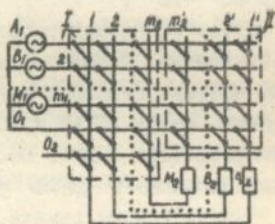


Рис. 15

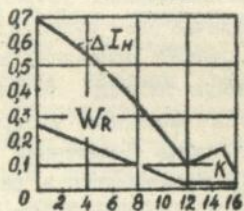


Рис. 16

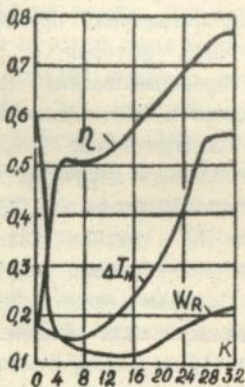


Рис. 17

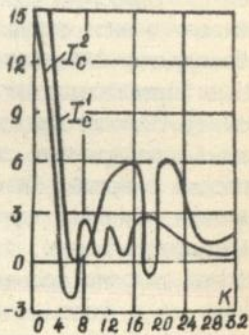


Рис. 18



воляет формально описать топологию любой известной структуры СПИ.

Разработаны принципы построения и теория многофазных СПИ, которая включает в себя математические модели в виде составной системы обыкновенных дифференциальных уравнений, оригинальные алгоритмы переключения криотронов, позволяющие повысить надежность и КПД преобразователя, новые конструктивные решения высокотемпературных СПИ с высокими энергетическими показателями. Синтезированы новые способы и алгоритмы оптимального управления вводом энергии в СПС, достигнуты следующие цели: за один (каждый) цикл работы вводится ток  $\Delta I_H$  в нагрузку больше, чем  $\Delta I_H$ , при этом в случае 1) с минимальными потерями  $W_R$  энергии в "холодной" зоне, а в случае 2) с максимальным КПД  $\eta$ . Сформулированная задача решена при помощи точного негладкого штрафа почти-градиентным методом (15). Определены оптимальные времена включения вентилях ПИ АИ и СПИ (см. рис.13), сформирована целевая функция оптимального управления СПС в виде

$$CF(\gamma) = CF_0(\gamma) - C_{pen} \max\{\gamma, I_H - I_H(\gamma)\} - C_{bar} \left[ \frac{1}{u - u_{min}} + \frac{1}{u_{max} - u} \right] + \sum_{j=1}^N \left[ \frac{1}{t_B^j} + \frac{1}{t_K^j} + \frac{1}{t_{II}^j - t_{II}^{min}} + \frac{1}{t_{II}^{max} - t_{II}^j} \right],$$

где  $\gamma$  - вектор управления;  $N$  - число циклов (Ц) работы СПИ;  $CF_0$  равна  $W_R$  в первом случае и  $\eta$  - во втором;  $C_{pen}$  - коэффициент штрафа;  $C_{bar}$  - коэффициент барьера;  $u$  - напряжение на выходе ПИ АИ;  $t_B, t_K$  - время внекоммутационного и коммутационного интервалов. Результаты оптимального синтеза параметров управления приведены на рис.16 для случая 1), а на рис.17,18 - для случая 2) для первого цикла работы АИ. Здесь:  $I_C^{1,2}$  - амплитуда тока коммутации в первом и втором контурах СПИ (рис.13);  $k$  - число вычислений целевой функции. Из рис.17,18 видно, что выигрыш по КПД при оптимальном управлении составляет на первом цикле более 79 %, а по потерям - порядка 63 %, далее выигрыш уменьшается по экспоненциальному закону. Интегральный КПД СПИ (за все время ввода энергии) составляет 96%, что впервые позволяет реализовать режим непрерывной стабилизации тока в СИМС.

В приложении приведена справка о внедрении результатов диссертационной работы за 1982-1991 гг., дана краткая характеристика основных практических разработок по теме диссертации, показаны оригинальные силовые схемы и системы управления, пуска и защиты, которые в совокупности с оригинальными процедурами параметрического синтеза обеспечивают высокую эффективность процессов преобразования параметров электрической энергии.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе создана оригинальная теория оптимального параметрического синтеза статических электрических цепей с сосредоточенными параметрами, разработаны теоретические положения, оригинальные способы, алгоритмы и пакеты программ параметрического синтеза АИ, совокупность которых является новым крупным достижением в развитии теоретических основ электротехники и преобразовательной техники. При этом получены следующие результаты:

1. Выявлено единое понятие "движение" и установлена конкретная совокупность принципов симметрии, сохранения и экстремальности, на основе которых построена полная система понятий и принципов параметрического синтеза АИ. Установлены "кинематические" закономерности движения в линейных ЭЦ, определены вид и форма уравнений, отображающих эти закономерности, найдены общие и частные решения уравнений, обоснован физический смысл их коэффициентов. Определена мера общего между параметрами движения в разнородных элементах ЭЦ, синтезированы АИ, оптимальные по совокупности показателей качества.

2. Установлены общесистемные свойства аддитивности, инвариантности и ортогональности компонент движения в евклидовом пространстве ЭЦ, определены единые физически прозрачные параметры, которые адекватно характеризуют движение не только в каждом элементе, но и во всем АИ в целом. Показано, что множеству переменных состояния ЭЦ присуща цилиндрическая группа симметрии, а численные значения сосредоточенных параметров и показателей качества электромагнитных процессов определяются обобщенными "кинематическими" характеристиками - кривизной и кручением.

3. Установлены электрокинематические аналогии между вращательным движением в механике и движением в линейных элементах ЭЦ, разработаны "кинематические" модели меры, скорости и направленности движения, которые единым образом (вне зависимости от природы сил) отображают "форму" общесистемного движения. Определена полная система допустимых в евклидовом (линейном) пространстве ЭЦ траекторий движения с постоянной положительной кривизной, которые обладают минимальным суммарным "действием" по отношению ко всем допустимым в цепи формам движения.

4. Установлено, что необходимым и достаточным условиями минимизации (компенсации) неактивных составляющих среднеквадратичной скорости "движения" энергии (полной мощности), которые вызывают перетоки, искажение оптимальной траектории движения и, как след-

ствие, дополнительные потери энергии в ЭЦ АИ, является стремление к нулю реактивной части нормальной аналитической функции мгновенной мощности. Показано, что эффективность рассмотренных способов компенсации повышается при одновременной минимизации: реактивной мощности сдвига по одноименным парам гармоник тока и напряжения и мощности искажения по совокупности гармоник тока или напряжения из разноименных областей.

5. Выполнены обобщение и систематизация методов определения чувствительности в задаче параметрического синтеза ЭЦ АИ с учетом изломов и скачков траекторий движения переменных состояния и целевых функций. Показано, что "кинематическая" модель направленности движения, построенная по принципу обратных задач, позволяет выделить среди возможных направления наискорейшего убывания целевых функций, в том числе в условиях их недифференцируемости и, как следствие, - повысить быстродействие и точность процедур параметрического синтеза АИ по сравнению с известными поисковыми процедурами.

6. Установлены новые аспекты метода кинематических аналогий в задаче параметрического синтеза ЭЦ АИ, которые позволяют повысить уровень формализации процедур многокритериального выбора, сформулирован принцип оптимальности движения. Показано, что принцип является достаточно общим, поскольку аддитивным образом учитывает свойства симметрии, сохранения и экстремальности электромагнитной среды и тем самым обеспечивает элементам АИ самые благоприятные с энергетической точки зрения условия существования в этой среде.

7. Разработан оригинальный алгоритм многокритериального параметрического синтеза АИ, который, в отличие от существующих, активным образом формирует компоненты векторной целевой функции АИ в виде открытой группы свободных и открытой группы вынужденных составляющих, что позволяет уменьшить долю субъективных показателей качества, формализовать и углубить процедуры выбора компромиссных решений, повысить качество и достоверность конечных результатов синтеза.

8. Выполнено систематическое обобщение основных разделов теории статических СП преобразователей: предложены принципы построения, проведена классификация схемных решений, разработана теория многофазных СП преобразователей, создан программный комплекс моделирования электроэнергетических режимов их работы, синтезированы энергосберегающие алгоритмы управления. Показано, что энергетически оптимальными являются режим коммутации ЭДС в нуле тока вторичной обмотки и алгоритмы работы с постоянной амплитудой тока в

первичной обмотке СП трансформатора.

9. На основе проведенных теоретических исследований разработаны и внедрены в эксплуатацию автономные инверторы и преобразователи частоты, аппаратные и программные средства, подтвердившие достоверность теоретических выводов и практических рекомендаций, полученных в диссертации. Суммарный годовой экономический эффект от внедрения разработок за 1982-1991 гг. с учетом долевого участия автора составил 366,4 тыс.руб., а за все время их использования - более 1 млн.руб. Экономия достигнута за счет снижения уровня потребляемой и повышения качества выходной энергии, уменьшения массогабаритных и повышения технико-экономических показателей изделий, улучшения режимов работы их элементов.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Тонкаль В.Е., Мельничук Л.П., Новосельцев А.В., Дыхненко Ю.И. Полупроводниковые преобразователи модуляционного типа с промежуточным звеном повышенной частоты. - Киев: Наук.думка. - 1981. - 252с.
2. Тонкаль В.Е., Новосельцев А.В., Черных Ю.К. Оптимизация параметров автономных инверторов. - Киев: Наук.думка. - 1985. - 220с.
3. Тонкаль В.Е., Новосельцев А.В., Скосарихин Ю.В., Непогодьев С.В. Введение в теорию статических сверхпроводниковых преобразователей. - Киев: Наук.думка. - 1990. - 184 с.
4. Новосельцев А.В. Субчувствительность силовых цепей полупроводниковых преобразователей. - Киев, 1985. - 61 с. - (Препринт / АН УССР. Ин-т электродинамики; № 435).
5. Новосельцев А.В. Математическая модель оптимальных процессов в линейной цепи. - Киев, 1986. - 27 с. - (Препринт / АН УССР. Ин-т электродинамики; № 482).
6. Новосельцев А.В., Денисюк С.П. Применение декомпозиционно-редукционных методов и моделей при оптимизации вентиляльных преобразователей. - Киев, 1986. - 47 с. - (Препринт / АН УССР. Ин-т электродинамики; № 480).
7. Новосельцев А.В., Стрелков М.Т. Метод унитарного оператора в теории мощности электрических цепей. - Киев, 1987. - 53 с. - (Препринт / АН УССР. Ин-т электродинамики; № 497).
8. Новосельцев А.В. Дифференцируемость переменных состояния силовых цепей с вентилями // Техн. электродинамика. - 1986. - №4. - С.37-44.
9. Новосельцев А.В. Параметрический синтез силовых преобразователей с управляемыми вентилями // Динамика нелинейных процессов

управления. - М.: Ин-т проблем управления. - 1987. - С.167.

10. Тонкаль В.Е., Новосельцев А.В., Загурский В.Г., Черных Ю.К. Комплекс программ оптимизации вентильных преобразователей со структурно-параметрической адаптацией алгоритмов случайного поиска. - Киев: ФАП АН УССР. - 1988. - № 50890000029. - 14с.

11. Новосельцев А.В., Скобарихин Ю.В., Непогодьев С.В. Анализ инверторных режимов работы сверхпроводникового преобразователя //Техн.электродинамика. - 1989. - № 1. - С. 35-40.

12. Новосельцев А.В. Симметрия отображения переменных состояния линейной электрической цепи// Электрон.моделирование. - 1989. - т.II. - № 4. - С.35-38.

13. Тонкаль В.Е., Новосельцев А.В., Стрелков М.Т. Сопряженные формы интегральных составляющих мощности// Электрон.моделирование. - 1989. - т.II - № 1. - С.26-35.

14. Новосельцев А.В. Мера движения в электрических системах// Докл. АН УССР, сер.А. - 1990. - № 6. - С.79-81.

15. Новосельцев А.В. Методологические аспекты теории преобразователей //Вісн. АН УССР. - 1990. - № 7. С.16-22.

16. Новосельцев А.В. Моделирование и управление энергосбережением в системах с вентильными преобразователями// Проблемы комплексной автоматизации. - Киев: Київський політехн. ін-т. - 1990. - С.103-107.

17. Новосельцев А.В. Минимальные формы свободного движения в электрической системе //Докл. АН УССР, сер.А. - 1990. - №1. - С.75-77.

18. Новосельцев А.В. Экстремальные формы свободного движения в электрической цепи //Техн.электродинамика. - 1991. - №2. - С.29-33.

19. Новосельцев А.В. Метод кинематических аналогий в теории параметрической оптимизации автономных инверторов //Проблемы преобразовательной техники. - Киев: Ин-т электродинамики АН УССР. - 1991. - С.12-14.

20. Новосельцев А.В. Новые аспекты метода кинематических аналогий в электротехнике //Техн. электродинамика. - 1992. - №3. - С.37-44.

21. Новосельцев А.В. Принцип оптимальности движения в электрических цепях и системах //Докл. АН Украины. - 1992. - №5. - С.79-82.

22. А.с. 955449 (СССР). Преобразователь постоянного напряжения в квазисинусоидальное /Л.П.Мельничук, А.В.Новосельцев, Ю.И.Дыхненко. - Опубл. 30.08.82, Бюл. № 32.

23. А.с. 1272429 (СССР). Преобразователь постоянного напряжения в ступенчатое переменное / К.А.Липковский, А.В.Новосельцев,

О.В.Лялько, С.В.Непогодьев. - Оpubл. 23.II.86, Бюл. № 43.

24. А.с. I377759 (СССР). Способ определения реактивной мощности /В.Е.Тонкаль, А.В.Новосельцев, М.Т.Стрелков. - Оpubл. 29.02.88, Бюл. № 8.

25. А.с. I534692 (СССР). Цифровое многоканальное устройство для управления инвертором /А.В.Новосельцев, В.О.Костюк, М.Т.Стрелков. - Оpubл. 07.01.90, Бюл. № I.

26. А.с. I550592 (СССР). Способ динамической компенсации неактивных составляющих мощности /А.В.Новосельцев, М.Т.Стрелков, В.О.Костюк. - Оpubл. I5.0.90. - Бюл. № IO.

27. А.с. I647704 (СССР). Способ коммутации токов з фазах сверхпроводникового преобразователя /А.В.Кузьмин, Ю.В.Скобарихин, А.В.Новосельцев, С.В.Непогодьев. - Оpubл. 07.05.9I, Бюл. № I7.

28. Novoseltsev A.V., Denisjuk S.P. Simulation of electromagnetic processes in nonlinear networks//Proc.5-th Intern.symp.System-Modelling-Control.-v.2.-Zakopane:WPI.-p.134-139.

29. Novoseltsev A.V.State variable sensitivity in power inverter circuits to predetermined influences//Proc.8-th Intern. symp. on EMC.-v.2.- Wroclaw:WPI.-1986.-p.716-725.

30.Tonkal V.E.,Novoseltsev A.V. Electromagnetic compatibility (EMC) of power converters as a problem of parametric optimization//Proc. Intern. symp. on EMC. -v.2.-Tokyo:IECE.-1984.-p.144-147.

3I.Tonkal V.E.,Novoseltsev A.V. Parameter optimization for power converters with high-frequency intermediate link//Proc.5-th Power Electr. conf.-v.3.-Budapest:MTESZ.-1985.-p.221-230.

32.Tonkal V.E.,Novoseltsev A.V.State variables sensitivity to predetermined influences in power line converters//Proc. Intern. Telecom. Energy conf.-Toronto:INTELEC.-1986.-p.469-478.

Соискателем написаны самостоятельно: в монографии I главы 2, 3, 4; в монографии 2 глава I, в монографии 3 главы I,2. Написаны совместно с соавторами: в монографии I главы 6,7; в монографии 2 главы 3, 4; в монографии 3 главы 4, 6, 7. В работах 6,7,10,28,3I,32 соискателем осуществлена постановка задач и разработаны основные теоретические положения. Результаты работ II,13,22-27,30 принадлежат авторам в разной мере.

*А. Новосельцев*

Подписано к печати 03.07.92 г.  
Бумага офсетная. Усл.- печ. лист. 2,0.  
Тираж 100. Заказ 796. Бесплатно.

Формат 60x84/ 16  
Уч.- изд. лист.2,0

---

ФЛ Института электродинамики АН Украины  
252057, Киев- 57, Проспект Победы, 56.

467829

AB 25.734

37