

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ  
ГОСУДАРСТВЕННАЯ ГОРНАЯ АКАДЕМИЯ УКРАИНЫ

На правах рукописи

ВЫПАНАСЕНКО Станислав Иванович

УДК 621.311:621.34

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ ТОКА  
ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЙ  
И ТРАНСПОРТА  
(РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ, СИНТЕЗ ПАРАМЕТРОВ, РАЗРАБОТКА)

Специальность 05.09.03 - электротехнические  
комплексы и системы, включая  
их управление и регулирование

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Днепропетровск - 1995

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00754435 (S)

На правах рукописи

ВЫПАНАСЕНКО Станислав Иванович

УДК 621.311:621.34

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ ТОКА  
ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЙ  
И ТРАНСПОРТА  
(РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ, СИНТЕЗ ПАРАМЕТРОВ, РАЗРАБОТКА)

Специальность 05.09.03 - электротехнические  
комплексы и системы, включая  
их управление и регулирование

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Днепропетровск - 1995

Диссертация представлена в форме рукописи.

Работа выполнена в Государственной горной академии  
Украины.

Научный консультант: чл.-корр. АН Украины,  
д-р техн. наук, проф.  
Пивняк Геннадий Григорьевич

Официальные оппоненты: д-р техн. наук, проф.  
Долбня Виктор Тимофеевич,

д-р техн. наук, проф.  
Костин Николай Александрович,

д-р техн. наук  
Исаков Владимир Николаевич

Ведущая организация: Донецкий научно-исследовательский  
угольный институт (ДонУГИ)

Защита состоится "28" сентября 1995 г. в 14:00 час.  
на заседании специализированного совета Д 068.08.02 по защите  
диссертаций при Государственной горной академии Украины  
(320027, Днепропетровск-27, проспект К.Маркса, 19, тел. 47-24-11).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственной горной академии Украины.

Автореферат разослан "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1995 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета,  
канд. техн. наук, доцент



В. Т. Занка

ЛНБ ім. В. Стефаніка  
АН України

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность** проблемы. Электротехнические комплексы тока повышенной частоты, обеспечивающие передачу энергии технологическим объектам и транспортным средствам посредством создаваемых магнитных полей и использующие в качестве источников питания двухзвенные тиристорные преобразователи частоты, получили широкое применение в металлургии, машиностроении, горной промышленности благодаря высокой эффективности, обусловленной особенностями тока повышенной частоты. Хорошая трансформируемость тока позволяет реализовать системы, исключаящие гальваническую связь потребителя с источником питания, обеспечивающие передачу энергии подвижным объектам, использующие специфические эффекты, связанные с протеканием тока повышенной частоты (поверхностный эффект, эффект близости). Известны высокоэффективные технологии индукционного нагрева материалов (плавка, ковка, штамповка, закалка, отпуск), плазмотроны, системы ультразвуковой обработки материалов, электродинамической сепарации, бесконтактного электрического транспорта и др. Указанные преимущества создают предпосылки для разработки новых систем, расширяющих область применения токов повышенной частоты, отвечающих современным требованиям энергосберегающих технологий.

Энергетические, массогабаритные показатели этих систем, возможности в управлении технологическими процессами в значительной мере зависят от режимов работы электротехнологических комплексов. Правильный выбор режимов функционирования способствует не только улучшению эксплуатационных характеристик, но и, в случае реализации дополнительных функций, расширению возможности самой технологии. Отсутствие единых подходов к формированию режимов зачастую является причиной реализации недостаточно обоснованных технических решений, не учитывающих взаимной обусловленности параметров режима отдельных звеньев системы, особенностей конкретной технологии. Актуально создание научно обоснованных подходов к формированию режимов работы комплексов, развитие теории этих систем, позволяющие подойти к решению задач синтеза с единых позиций и реализовать на этой основе высокопроизводительные энергосберегающие электротехнологии.

Исследования в области анализа и синтеза электротехнологических комплексов тока повышенной частоты в основном развивались в двух направлениях: изучение цепей электротехнологической нагрузки и источника питания. Прослеживалась тенденция к обособ-

ленному анализу этих составляющих единой системы, которая проявлялась в недостаточном учете особенностей электротехнологии при проектировании преобразовательных устройств и недооценке возможностей преобразователей в части эффективного управления технологическим процессом. Устранение этих недостатков возможно на основе комплексного исследования систем с реализацией новых идей и решений по формированию режимов их функционирования.

В основу диссертационной работы положены исследования, выполняемые Днепропетровским горным институтом (с 1993 г. - Государственная горная академия Украины) по тематике научно-исследовательских работ в соответствии с целевой комплексной научно-технической программой 0.Ц.023 "Создание и широкое использование в народном хозяйстве силовой полупроводниковой техники", п.04.01 (постановление ГКНТ, Госплана СССР и АН СССР от 12.12.1980 г.); республиканским планом важнейших НИР в области естественных и общественных наук (постановление Президиума АН УССР № 537 от 5.12.1984 г.); программой Минвуза СССР "Экономия электроэнергии" (приказ № 101 от 09.02.1987 г.); планами Минвуза УССР (приказ № 68 от 31.03.1992 г., письмо № 600-18/1522 от 30.12.1987 г.); Государственной научно-технической программой Украины "Электротехника" на 1993-1994 г.г., разд. 8, п.8.5.3; программой Государственного комитета Украины по вопросам науки и технологии "Фундаментальные исследования и внедрение в производство энергосберегающих технологий электромагнитной обработки металлов" на 1992-1994 г.г., задание 5.42.04/015; координационным планом НИР АН Украины по комплексной проблеме "Научные основы электроэнергетики" (1991-1995 г.г.).

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является разработка общих подходов и принципов формирования, теоретических аспектов реализации режимов функционирования электротехнологических комплексов тока повышенной частоты, синтез параметров и создание на этой основе систем с высокими технико-экономическими показателями.

В диссертационной работе поставлены и решены следующие научные задачи:

- создание общих подходов и принципов формирования режимов работы электротехнологических комплексов тока повышенной частоты, учитывающих взаимную обусловленность параметров режима отдельных элементов системы, определяющих приоритет некоторых режимов, исходя из позиций комплексного исследования систем;

- развитие теории этих комплексов как особого класса резонансных высокодобротных электрических цепей, заключающееся в анализе специфичных режимов работы цепей, обусловленных применением новых структурных построений и изменением их параметров использованием новых способов управления и регулирования, получении неизвестных ранее зависимостей, характеризующих эти режимы, осуществляемое математическим моделированием процессов в цепях электротехнологических нагрузок и источников питания, создающее основу для решения оптимизационных задач с учетом принятых показателей эффективности;

\* синтез параметров режима, характерных для определенных разновидностей электротехнических комплексов, обладающих общими свойствами (электротехнологии обработки материалов в магнитном поле, электротехнологии, показатели эффективности которых имеют выраженные частотные свойства, системы с широкими пределами изменения параметров нагрузки, системы с последовательным включением потребителей), осуществляемый на основе разработанных принципов и подходов, анализа процессов в электрических цепях, постановки и решения задач параметрической оптимизации, позволяющий реализовать принципиально новые электротехнологии, создать системы с высокими технико-экономическими показателями;

- выполнение экспериментальных исследований, позволяющих обосновать исходные предпосылки и принятые в анализе процессов допущения, подтверждающих эффективность разработанных технических и технологических решений. Разработка, промышленные испытания электротехнических комплексов, использующих предложенные технические решения, внедрение результатов исследований.

**Методы исследования.** При исследовании стационарных и переходных процессов в электротехнических комплексах, решении задач параметрической оптимизации использованы кусочно-припасовочный, операторный методы, методы основной гармоник эквивалентных генераторов, гармонического анализа, эллиптического гистерезиса, исследования операций, численного интегрирования систем дифференциальных уравнений.

Основные научные положения и результаты, выносимые на защиту, их новизна.

1. Способ обработки материалов в переменном магнитном поле с целью разупрочнения, заключающийся в том, что обработку осуществляют в диапазоне повышенных частот с напряженностью

поля в области выраженных действий магнитострикционного эффекта, пондеромоторных сил. В отличие от известного способа обработки, предполагающего термическое воздействие, использование указанных параметров режима позволяет качественно изменить процесс, введя в действие иные механизмы разупрочнения материалов, и достичь существенного снижения его энергоемкости. Способ является основой для создания энергосберегающих технологий промышленной дезинтеграции руд полезных ископаемых.

2. Методологические принципы оптимизации системы "соле-нонд-обрабатываемый материал", заключающиеся в формировании обобщенного критерия, учитывающего показатели эффективности технологического процесса и комплекса в целом, в выделении области оптимальных конструктивных параметров, в пределах которой значение целевой функции близко к экстремальному, что расширяет возможности для согласования параметров источника и нагрузки, позволяет улучшить энергетические и массогабаритные показатели системы.

3. Принципиально новый подход к управлению процессами в электротехнологиях, показатели эффективности которых обладают выраженными частотными зависимостями, заключающийся в использовании тока несинусоидальной формы с регулированием отношения мощностей отдельных гармоник либо их абсолютных значений. Разработанный подход позволяет реализовать режимы работы комплексов, близкие к трудноосуществимому непрерывному регулированию в широких пределах частоты синусоидального тока, раскрывает возможности для качественно нового управления технологическими процессами на основе воздействий, осуществляемых гармоническими составляющими тока.

4. Способ независимого регулирования мощностей отдельных потребителей в системе с их последовательным включением, заключающийся в том, что регулирование осуществляют как изменением сопротивлений потребителей, так и тока в последовательной цепи. При этом значение тока зависит от мощности наиболее нагруженного потребителя. В системе бесконтактного транспорта регулирование позволяет уменьшить потери энергии в тяговой сети.

5. Повышение устойчивости инвертирования путем увеличения углов запираания тиристоров при пуске электротехнологических комплексов индукционного нагрева материалов, использующих параллельный и последовательно-параллельный автономные инверторы тока, достигается с уменьшением длительности межкоммутационных интервалов в одном или нескольких циклах коммутации

тристоров по отношению к их длительности в квазиустановившемся режиме.

**Достоверность** научных положений, выводов, рекомендаций подтверждена результатами экспериментальных исследований в лабораторных и промышленных условиях, опытом разработки и эксплуатации электротехнологических комплексов тока повышенной частоты.

**Георегическая ценность** исследования. В диссертационной работе дано научное обоснование технических и технологических решений, заключающееся в создании общих подходов к формированию параметров режима электротехнологических комплексов тока повышенной частоты, развитию теории этих комплексов как особого класса высокочастотных резонансных электрических цепей в области анализа режимов, приводящих к качественному изменению характера технологических процессов, расширению функциональных возможностей комплексов, а также получении ранее неизвестных функциональных зависимостей, характеризующих эти режимы, синтезе на этой основе параметров режима комплексов, обладающих общими свойствами в характере протекающих процессов, их структурном построении, пределах изменения параметров нагрузки, позволяющее реализовать принципиально новые электротехнологии, создать системы с высокими технико-экономическими показателями.

**Практическое значение** работы состоит в использовании разработанных принципов и подходов к формированию режимов работы электротехнологических комплексов, в разработке новых технических решений, позволяющих реализовать эффективные режимы работы систем:

- даны исходные предпосылки к выбору эксплуатационных режимов работы электротехнологических комплексов на основе разработанных подходов и принципов;

- синтезированы режимы работы электротехнологических комплексов, обеспечивающие высокие технико-экономические показатели систем, эффективное протекание технологических процессов;

- дано обоснование структурного построения цепей электротехнологических нагрузок и источников питания систем, разработаны способы управления и регулирования, обеспечивающие заданные режимы функционирования электротехнологических комплексов. В частности, разработана конструкция системы "соленой" - обрабатываемый материал", предложены варианты индивидуального и централизованного питания этой системы током повышенной частоты, определены рациональные структуры тиристорного преобра-

зователя частоты, цепи нагрузки комплекса бесконтактного электрического транспорта, разработаны способы регулирования угла нагрузки, тока в тяговой сети;

-разработаны методики расчета электрооборудования комплексов, параметров режима их работы: методика расчета системы "соле-ноид - обрабатываемый материал", обобщенная методика расчета инверторов с умножением частоты, методика расчета активной мощности и ее гармонических составляющих в цепях электротехнологической нагрузки несинусоидальной формой тока;

-разработан способ обработки материалов в магнитном поле, позволяющий реализовать энергосберегающие технологии их разупрочнения. На его основе создана технология разупрочнения железной руды перед измельчением в шаровой мельнице. Практическая ценность разработки подтверждена результатами промышленного эксперимента.

**Реализация** результатов работы. Полученные научные результаты явились основой для разработки, создания и внедрения ряда устройств и электротехнологических комплексов. В частности:

-тиристорного преобразователя частоты ТПЧ-100-10-УХЛ4, выпускаемого НПО "Электротехника" г.Таллинн. Этот преобразователь используется в качестве источника питания электротехнологических комплексов тока повышенной частоты различного целевого назначения, в частности, систем индукционного нагрева;

-комплекса бесконтактного электрического транспорта и его источника питания - тягового тиристорного преобразователя частоты ТОВ1-160-1.2-4000 УХЛ4. Комплексы эксплуатируются на шахтах "Известия" ПО "Донецк-антрацит"; "Лутугинская" ПО "Луганскуголь";

-экспериментального образца установки для обработки железной руды в магнитном поле.

Схемотехнические решения и техническая документация на разработанные преобразователи частоты для индукционного нагрева и бесконтактного электрического транспорта переданы Запорожскому электроаппаратному заводу для освоения серийного выпуска этих преобразователей в Украине.

Подтвержденный годовой экономический эффект от внедрения результатов работы составил 300 тыс.руб. в ценах 1990г. и 12 млн. крб. в ценах 1993г.

**Апробация** работы. Материалы диссертации докладывались на Всесоюзных научно-технических конференциях "Применение в технологических процессах машиностроительного производства полу-

проводниковых преобразователей частоты" (Уфа, 1980г), "Проблемы преобразовательной техники" (Киев, 1983, 1987, 1991г), "Автоматизация новейших технологических процессов в машиностроении на основе применения полупроводниковых преобразователей частоты с целью экономии материалов, трудовых, энергетических ресурсов" (Уфа, 1984г), "Разработка методов и средств экономии электроэнергии в электрических системах и системах электроснабжения промышленности и транспорта" (Днепропетровск, 1990г), международной научно-технической конференции "Силовая электроника в решении проблем ресурса и энергосбережения" (Алушта, 1993г); на семинарах Научного Совета АН Украины по комплексной проблеме "Научные основы электроэнергетики" (Днепропетровск, 1983-1994г).

Публикации. Результаты работы отражены в 61 печатной работе, в том числе: 1 монографии, 1 препринт, 19 авторских свидетельств и патенте, статьях и докладах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы (274 наименования) (том 1) и приложений (том 2). Объем первого тома 378 страниц (306 страниц основного текста, 45 страниц рисунков и таблиц); объем второго тома 60 страниц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе разработаны общие подходы и принципы формирования режимов функционирования электротехнологических комплексов тока повышенной частоты.

Сформулированные принципы и подходы учитывают опыт предшествующих разработок, перспективные направления совершенствования комплексов, возможности новых, предложенных автором, технических решений. Разработанные подходы реализуют комплексный характер исследования систем, раскрывают механизм синтеза, наиболее характерные особенности в процедуре формирования режимов. Основные позиции предлагаемых подходов состоят в следующем:

- основой для формирования режимов работы комплекса являются параметры технологического процесса; режимы формируются с учетом показателей качества технологического процесса и комплекса в целом;
- комплекс условно расчленяют на составляющие (преобразователь частоты, электротехнологическая нагрузка) с формированием

соответствующих этому расчленению параметров режима и выделением в качестве промежуточных выходных параметров преобразователя частоты.

Разработанные принципы отражают приоритетный характер некоторых режимов. Улучшение показателей эффективности электротехнологий и комплексов достигается качественным изменением технологических процессов, расширением функциональных возможностей комплексов, исключением режимов, характеризующихся низкими и энергетическими показателями.

Особенность разработанных подходов к формированию режимов заключается в их универсальности. Сформулированные принципы распространяются на определенный класс систем, для которых применение принципов возможно и целесообразно. В работе выделено несколько разновидностей таких систем, обладающих общими свойствами: с широкими пределами изменения параметров нагрузки, с последовательным включением потребителей, электротехнологии обработки материалов в магнитном поле, электротехнологии, показатели эффективности которых имеют важные частотные свойства. Применение разработанных принципов и подходов к исследованию перечисленных систем позволило выявить рациональные режимы их работы, характерные для каждой разновидности, и создать на этой основе электротехнологические комплексы с высокими технико-экономическими показателями. Сделан акцент на исследование режимов работы типичных представителей названных систем: комплексов индукционного нагрева материалов, обработки железной руды в магнитном поле, бесконтактного электрического транспорта. Удельный вес этих комплексов в общей совокупности систем, использующих токи повышенной частоты, достаточно велик, что повышает практическую значимость полученных результатов. Табл. I иллюстрирует предлагаемые режимы работы комплексов.

Теоретической основой синтеза предложенных режимов является анализ электромагнитных процессов в электрических и магнитных цепях, поиск функциональных связей между параметрами цепей и показателями эффективности работы комплекса, постановка и решение задач структурной и параметрической оптимизации, разработка эффективных способов управления и регулирования, методик инженерного расчета электрооборудования.

Во второй главе выполнен анализ электромагнитных процессов в цепях нагрузки электротехнологических комплексов обработки материалов в магнитном поле.

## Применение разработанных принципов формирования режимов

Разновидности электротехнологий и систем	Применяемый принцип формирования режима	Предложенный режим работы	Положительный эффект от использования режима
Электротехнологии обработки материалов в магнитном поле	Использование режимов, приводящих к качественному изменению процессов в электротехнологии	Обработка в диапазоне повышенных частот с напряженностью поля в области магнотрикции эффекта	Разупрочнение материала с низкой энергоемкостью процесса, повышение качества продуктов измельчения
Электротехнологии с выраженными частотными свойствами	Использование режимов, приводящих к расширению функциональных возможностей комплекса	Регулирование мощностей гармонических составляющих тока	Эффективное управление технологическим процессом
Системы с широкими пределами изменения параметров нагрузки	Исключение режимов работы комплекса, приводящих к ухудшению его показателей эффективности, если действие	Стабилизация угла нагрузки, ограничение потребляемой мощности	Улучшение энергетических и массогабаритных показателей комплекса
Системы с последовательным включением потребителей	не сопровождается существенным ухудшением показателей качества технологического процесса	Полное или частичное исключение режима стабилизации тока	Улучшение энергетических показателей комплекса

Электрические методы обработки материалов в магнитном поле с целью разупрочнения перед их измельчением отвечают новым принципам интеграции промышленного сырья. Отсутствие непосредственного контакта между источником и потребителем

энергии, возможность целенаправленной передачи энергии в зону разрушения, равномерность воздействия по всему объему материала позволяет рассматривать такую обработку в числе наиболее перспективных методов селективного разрушения.

В работе предложены новый способ обработки материалов в переменном магнитном поле. Обрабатываемый материал (руда) содержит сростки рудной и нерудной фаз. Одна из фаз обладает выраженными магнитострикционными, ферромагнитными свойствами. В другой фазе эти свойства выражены в меньшей степени либо полностью отсутствуют. Материал имеет низкую электрическую проводимость. Это обеспечивается в том случае, если обе фазы горной породы обладают высоким удельным сопротивлением либо вкрапления фазы проводящего материала не образуют цепи для протекания тока. Суть способа состоит в том, что обрабатываемый материал подвергается воздействию переменного магнитного поля в диапазоне повышенных частот, а затем, без задержки во времени, осуществляют механическое нагружение. Селективное воздействие поля на одну из фаз обрабатываемого материала приводит к возникновению внутренних пульсирующих напряжений. Многократные пульсации способствуют образованию микротрещин и, как следствие, снижают прочность материала. В отличие от известного способа обработки материалов в поле сверхвысокой частоты, предусматривающего тепловое воздействие, обработка в предлагаемом диапазоне частот позволяет увеличить напряженность магнитного поля, качественно изменить процесс, введя в действие другие механизмы разупрочнения: магнитострикцию, пондеромоторные силы. При этом разупрочнение материала обеспечивается при более низкой энергоемкости процесса обработки. Перспективно применение способа для обработки горных пород перед их измельчением в технологической цепи обогащения полезных ископаемых.

На основе способа разработана технология обработки железной руды в магнитном поле перед измельчением в шаровой мельнице. Обработка руды позволяет снизить энергоемкость процесса измельчения, повысить качество концентрата. В работе решен ряд научных и технических задач, связанных с созданием электротехнологических комплексов обработки материалов в магнитном поле.

Показано, что в качестве устройства, создающего магнитное поле, может быть использован соленоид. Обладая простой конструкцией, соленоид позволяет концентрировать магнитное поле во внутренней полости и обеспечивает достаточно высокие значения напряженности поля при сравнительно низких потерях энергии в

его обмотке. Синтез режимов работы цепи электротехнологической нагрузки возможен на основе анализа электромагнитных процессов в системе "соленоид - обрабатываемый материал". Показатели разупрочнения материала, энергоёмкость процесса обработки зависят от таких параметров, как напряженность магнитного поля, ее производная, количество циклов нагружения. Отличие моделируемой системы от известных устройств, использующих для создания маг-

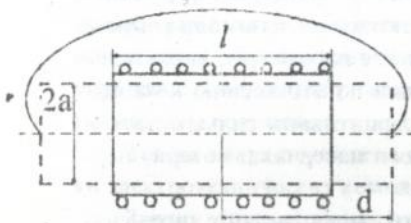


Рис. 1

нитного поля соленоид заключается в особом расположении обмотки соленоида и обрабатываемого материала, а значения электрических и магнитных параметров минерала. Загружаемый в соленоид материал приобретает форму цилиндра, причем часть материала расположена за

торцами соленоида (рис.1). Принято, что магнитная восприимчивость материала невелика и составляет десятые доли единицы. Это условие соблюдается при обработке руд с низкой концентрацией ферромагнитного материала а также руд, магнитная фракция которых не обладает высокой магнитной проницаемостью.

Ввод обрабатываемого материала вызывает уменьшение магнитного сопротивления внутренней полости соленоида. При неизменном токе в обмотке это приводит к росту магнитной индукции как в материале, так и вне его. Магнитную индукцию на оси загруженного соленоида получим из выражения

$$B_c = \frac{\mu_0 I w}{2 \ell R(d)} (\cos \beta_1 - \cos \beta_2),$$

Здесь  $\beta_1$  и  $\beta_2$  - углы, характеризующие положение рассматриваемой точки на оси соленоида.

Параметр  $R$  зависит от степени загрузки соленоида обрабатываемым материалом:

$$R(d) = k_c (d) \left[ \frac{1}{\mu} - 1 \right] + 1.$$

$$\text{Здесь } k_c = \frac{1}{\ell} \left( \sqrt{(d + \ell/2)^2 + a^2} - \sqrt{(d - \ell/2)^2 + a^2} \right).$$

Полученные зависимости отражают связь между параметрами загруженного и незагруженного солен. идов. Это позволяет контролировать параметры поля внутри загружаемого материала по известным значениям этих параметров в незагруженном соленоиде.

Установлено, что для рассматриваемой системы допущение об отсутствии падения магнитного напряжения на участке цепи, нагруженном материалом не приемлемо. Магнитное сопротивление нагруженного участка соленоида соизмеримо с сопротивлением воздушного участка цепи.

При протекании по обмотке соленоида переменного синусоидального тока для анализа процессов целесообразно использовать известное представление реальной петли гистерезиса ферромагнитного материала в виде эллипса. Это позволяет с помощью простых аналитических зависимостей рассчитать параметры, характеризующие запаздывание магнитной индукции по отношению к напряженности магнитного поля, значения коэрцитивной силы, остаточной магнитной индукции обрабатываемого материала, потери энергии на гистерезис.

Эффект разупрочнения минерального сырья связан с интенсивностью магнитного поля. В разных точках неоднородного магнитного поля соленоида эта интенсивность различна. Изменение магнитного поля вдоль оси соленоида может быть учтено усреднением его значения по длине загрузочной камеры. Введено понятие среднего значения магнитной индукции, при которой осуществляется обработка материала в магнитном поле:

$$B_{\text{м.ср}} = \frac{U_{\text{м}} \ell k_c(d)}{4\pi^2 a^2 d f k_a}$$

При обработке материалов важным показателем являются потери энергии на гистерезис. Уровень потерь зависит от напряженности магнитного поля и, следовательно, уменьшается в направлении от центра к торцам соленоида. Наряду со средним значением магнитной индукции введено понятие среднего значения удельной мощности (мощности, приходящейся на единицу объема материала) потерь на гистерезис. Относительное среднее значение удельной мощности потерь

$$\frac{P_{\text{о.ср}}}{P_{\text{о.б}}} = \frac{1}{4d k_a^2} \int_0^d \Psi^2(x) dx$$

$$\text{Здесь } \Psi = \frac{x + \ell/2}{\sqrt{(x + \ell/2)^2 + a^2}} - \frac{x - \ell/2}{\sqrt{(x - \ell/2)^2 + a^2}}, \quad P_{\text{о.б}} = \frac{B_{\text{м.о}}^2 \omega \sin \delta_2}{2\mu \mu_0}$$

Электрическую цепь системы "соленоид - обрабатываемый материал" можно представить параллельной и последовательной схемой замещения. В последовательной схеме замещения индуктивное сопротивление нагруженного соленоида удобно выразить в виде

суммы сопротивлений незагруженного соленоида и вносимого материалом  $X_m$

$$X_3 = X_n + X_m; \quad X_m = X_n \left[ \frac{1}{R(d)} - 1 \right].$$

Привлечение понятия эллиптического гистерезиса к анализу процессов позволяет рассматривать параметры магнитного поля загруженного соленоида как синусоидальные величины. При этом возможно построение векторных диаграмм, характеризующих различные режимы работы системы. Показано, что в загруженном соленоиде ток в обмотке опережает магнитный поток на угол меньший угла сдвига между напряженностью магнитного поля в материале и магнитным потоком.

Третья глава посвящена оптимизации параметров цепей нагрузки электротехнических комплексов тока повышенной частоты.

Задачу оптимизации параметров системы "соленоид - обрабатываемый материал" предложено сформулировать в следующей постановке: определить электрические, технологические, конструктивные параметры, которые обеспечивают максимальный коэффициент разупрочнения материала  $k_s$  при минимальной энергоёмкости процесса обработки. Показано, что такая постановка задачи учитывает показатели эффективности как технологического процесса, так и комплекса в целом, направлена на реализацию энергосберегающих технологий с высокими показателями эффективности.

Активную мощность потерь энергии при обработке материала  $P_n$  можно представить в виде суммы потерь в обмотке соленоида  $P_{n,об}$  и обрабатываемом материале  $P_{n,м}$ . Для отношения  $k_s/\sqrt{P_n}$  справедливо  $k_s/\sqrt{P_n} = \frac{k_a \ln N}{2\sqrt{k_e}} \cdot \delta_n(a, d, V)$ .

Здесь  $k_a, k_e$  - коэффициенты, характеризующие свойства обрабатываемого материала и материала обмотки соленоида;  $N$  - количество циклов нагружения;  $\delta_n$  - функция, зависящая от конструктивных параметров системы ( $V$  - объем загрузочной камеры).

Функция  $\delta_n$ , отражающая связь критериев оптимизации с конструктивными параметрами соленоида, принята в качестве целевой функции  $\delta_n(a, d, V) \rightarrow \max$ .

Ограничения представлены в виде  $a > 0, d > 0,5, V > 0$ . При заданном объеме загрузочной камеры  $V$  целевая функция имеет два оптимизируемые параметра ( $a$  и  $d$ ). Решение задачи нелинейного

программирования позволило получить следующие результаты. Установлена совокупность параметров  $a_*$  и  $d_*$ , при которых целевая функция имеет значения, близкие к максимальному. Эти параметры предложено считать оптимальными.

Установлено, что между оптимальными параметрами  $a_{*opt}$  и  $d_{*opt}$  существует зависимость, близкая к линейной. Это позволяет исключить из числа оптимизируемых параметров длину соленоида  $l$ , рассмотреть вариант безтрансформаторного согласования источника питания с нагрузкой. Безтрансформаторное согласование позволяет существенно упростить конструкцию системы, исключив метал-

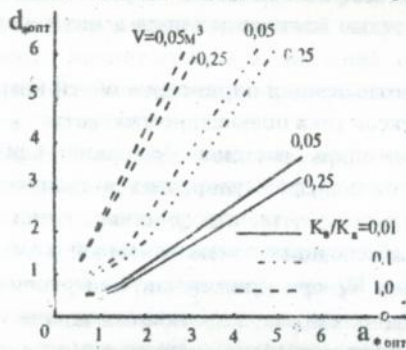


Рис. 2

лоемкие элементы, улучшить ее энергетические характеристики, снизить энергоемкость процесса обработки. Зависимость  $d_{*opt}(a_{*opt})$  приведена на рис. 2. Установлено, что с ростом влияния градиента напряженности магнитного поля на процесс разупрочнения, отношение оптимальных параметров  $d_{*opt}/a_{*opt}$  возрастает. Отношение в малой степени

зависит от объема загрузочной камеры, не зависит от частоты тока, магнитных и электрических параметров обрабатываемого материала, материала обмотки соленоида.

В условиях действующих технологических линий оптимальные параметры системы "соленоид - обрабатываемый материал" не всегда реализуемы. Если параметр  $d$  существенно превышает  $a$ , то соленоид целесообразно расчленить на несколько равных участков с оптимальными параметрами (секционировать соленоид). Установлено, что при обработке материалов, показатели разупрочнения которых зависят от градиента напряженности магнитного поля, секционирование соленоида позволяет снизить энергоемкость процесса обработки.

Выбор электрических (сила тока в обмотке и его частота) и технологических (время обработки) параметров системы предложено осуществлять с учетом конкретных особенностей электротехнологии и установленных функциональных связей с рассматриваемыми показателями эффективности.

Результаты оптимизации параметров системы "соленоид - обрабатываемый материал" позволили разработать методику инженерно-экономического расчета системы. Методика реализует вариант безтрансформаторного согласования источника питания с нагрузкой и учитывает возможности секционирования соленоида.

В главе исследованы режимы работы цепи нагрузки комплекса бесконтактного электрического транспорта. Транспорт является системой с широкими пределами изменения параметров нагрузки и последовательным включением потребителей. В системах с широкими пределами изменения параметров нагрузки целесообразно использовать режимы, при которых угол нагрузки  $\Phi_n$  стабилен или изменяется в небольших пределах. Стабилизация угла позволяет исключить режимы с низкой устойчивостью инвертирования и малым значением коэффициента мощности цепи нагрузки. В системе бесконтактного электрического транспорта такие режимы позволяют использовать в преобразователе частоты автономный инвертор тока и существенно улучшить массогабаритные показатели источника питания. При стабильной частоте тока нагрузки реализация кривой  $\Phi_n(R_n)$ , близкой к идеальной ( $\Phi_n = \text{const}$ ), может быть осуществлена формированием определенной структуры и выбором параметров цепи нагрузки. В режиме максимальной нагрузки ( $R_{n,\text{max}}$ ) целесообразно иметь характеристики параллельного инвертора тока, в режиме, близком к холостому ходу  $J_0$  - последовательного. Предложено формировать нагрузку в виде параллельно-последовательной цепи (р. с. 3). Параллельно первичной обмотке согласующего трансформатора Т включено компенсирующее устройство К, сопротивление которого  $X_{c1}$  имеет емкостной характер. Остаточное реактивное сопротивление последовательного контура  $R_n + jX_n$  тяговой сети также имеет емкостной характер. На рис. 4 показаны зависимости  $\Phi_n(R_n)$ , полученные для рассматриваемой структуры цепи нагрузки. Установлено, что приемлемы следующие значения параметров:

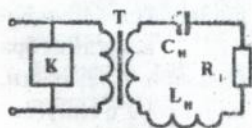


Рис. 3

$$X_{c1} = -8 \dots -6 \text{ Ом}, \quad X_n = -4 \dots -3 \text{ Ом}.$$

Недостаток рассматриваемых режимов заключается в увеличении угла  $\Phi_n$  при малых и больших значениях  $R_n$ . Недостаток можно устранить регулированием выходных параметров преобразователя частоты.

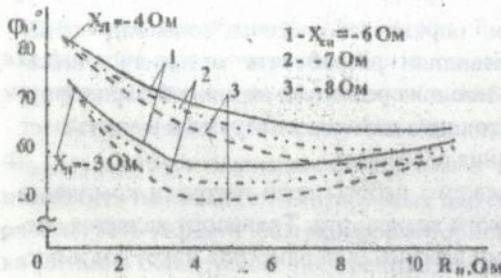


Рис. 4

Четвертая глава посвящена исследованию режимов работы тиристорных преобразователей частоты в электротехнологических комплексах. Расширение частотного диапазона и функциональных возможностей, улучшение энергетических и массогабаритных показателей, повышение надежности работы тиристорных преобразователей частоты возможно на основе единого подхода, заключающегося в использовании специфических, малоизученных режимов их работы. Эти режимы могут быть созданы изменением параметров элементов силовых цепей, упрощением их структуры, использованием новых способов пуска, управления и регулирования.

Для улучшения массогабаритных показателей тиристорных преобразователей частоты, повышения надежности их работы целесообразно использовать простые схемотехнические решения. Важно, чтобы эти решения обеспечивали требуемые показатели качества технологических процессов. Упростить структуру силовой цепи позволяют автономные инверторы с совмещенными функциями силовых элементов. Эти инверторы работают в специфических режимах. Коммутирующий конденсатор помимо своей основной функции выполняет роль разделительного конденсатора. Напряжение на конденсаторе содержит как переменную, так и постоянную составляющие. Индуктор электротермической установки помимо функции, заключающейся в создании магнитного поля, может выполнять роль коммутирующего реактора. В индукторе протекает несинусоидальный ток. Характер процессов в электрических цепях отличен от хорошо изученных режимов,

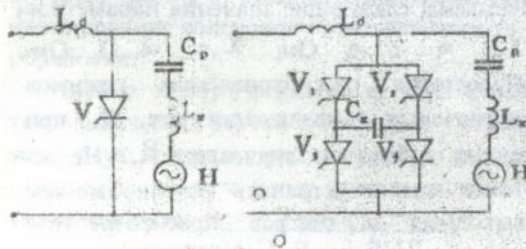


Рис. 5

предполагающих наличие разделительного конденсатора большой емкости, индуктора с синусоидальной формой тока.

Анализу под-

вергнуты режимы работы одноключевого и мостового инверторов с совмещенными функциями силовых элементов (рис. 5) Обоснованы и разработаны математические модели для исследования стационарных и пусковых процессов. Показано, что при описании стационарных процессов в электрических цепях автономных инверторов целесообразно выразить напряжения на элементах схемы, токи в ветвях инвертора в относительных единицах (как отношение к току  $I_d$ , потребляемому инвертором от источника питания). Применение относительных единиц позволило получить простые аналитические зависимости. Установлено, что в рассматриваемых инверторах специфичность формы напряжения на обкладках конденсатора является причиной изменения характера напряжения, прикладываемого к тиристорам. В схеме мостового инвертора возможны скачкообразные изменения угла запираания тиристоров  $\delta$ . Полученные функциональные зависимости позволяют рассчитывать параметры инверторов, исключая чрезмерное повышение уровня "раскачки" напряжения, снижение устойчивости инвертирования.

Повысить устойчивость инвертирования, расширить диапазон выходных частот позволяют инверторы, работающие в режиме умножения частоты. В таких инверторах выходная частота превышает частоту коммутации вентилях, что позволяет существенно увеличить время, предоставляемое тиристорам для восстановления их запирающих свойств. Режим умножения обеспечивается формой роанием коротких импульсов тока, воздействующих на цепи колебательного контура нагрузки, настроенного в резонанс с одной из высших гармонических составляющих этого тока. Инверторы используют в устройствах, допускающих несинусоидальность выходных параметров преобразователя (тока, напряжения). Разработана обобщенная методика расчета инверторов с умножением частоты. Основу разработанной методики составляют два подхода к выбору длительности импульсов тока, воздействующих на колебательный контур нагрузки. Первый подход предполагает учет нагрузочной способности полупроводниковых вентилях, второй - степени несинусоидальности выходного напряжения. Важно, чтобы обеспечивались высокие показатели нагрузочной способности вентилях и уровни используемых гармонических составляющих тока. Для расчета коэффициента гармоник определяют спектральный состав тока, действующего на цепи нагрузки, а также зависимость сопротивления контура нагрузки от частоты.

Для формы тока в виде разнополярных синусоидальных импульсов коэффициенты разложения кривой в ряд Фурье получим из выражений:

$$a_{*n} = -\frac{n_2}{2} \left[ \frac{\cos(n_2 - n) \pi / n_2}{n_2 - n} + \frac{\cos(n_2 + n) \pi / n_2}{n_2 + n} \frac{l}{n_2 - n} - \frac{l}{n_2 + n} \right];$$

$$b_{*n} = \frac{n_2}{2} \left[ \frac{\sin(n_2 - n) \pi / n_2}{n_2 - n} - \frac{\sin(n_2 + n) \pi / n_2}{n_2 + n} \right].$$

Отношение действующего значения тока  $n$ -й гармоники  $I_n$  к току  $I_d$  ( $I_{n*} = I_n / I_d$ ) будет:

$$I_{n*} = \sqrt{\frac{a_{*n}^2 + b_{*n}^2}{2}}.$$

Отличие режимов умножения частоты от режимов, предполагающих использование основной гармоники тока нагрузки, является причиной изменения энергетических показателей преобразователей. Установлено, что уровень потерь энергии в силовой цепи инвертора при протекании тока в виде синусоидальных или прямоугольных импульсов пропорционален отношению периода следования импульсов к их длительности. При проектировании преобразователей с умножением частоты особое внимание следует уделить снижению активных сопротивлений реакторов и шинопроводов с импульсной формой тока. Это позволит уменьшить уровень потерь энергии, повысить к.п.д. инвертора.

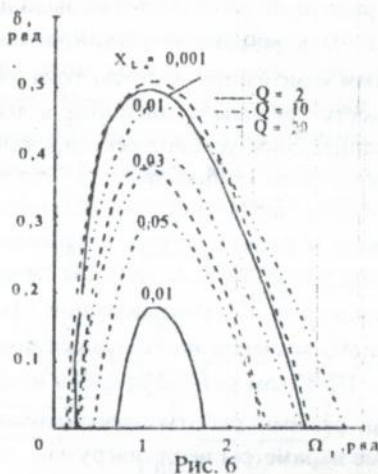
Рассмотрены варианты реализации источника питания в системе бесконтактного электрического транспорта на основе автономного инвертора тока, полумостового резонансного инвертора.

Характерные особенности комплекса обработки железной руды в магнитном поле (стабильность параметров нагрузки, отсутствие жестких требований к обеспечению качества выходного напряжения, низкая чувствительность к изменению частоты тока, исключение функции регулирования выходных параметров преобразователя) позволяют отказаться от использования в системе сложных источников питания с широкими функциональными возможностями.

Пятая глава посвящена решению задач управления и регулирования в электротехнических комплексах тока повышенной частоты.

В главе рассмотрены режимы работы комплексов, связанные с управлением и регулированием и относящиеся к определенному классу систем, обладающих общими свойствами.

Разработаны математические модели и исследованы алгоритмы пуска электротехнологических комплексов, имеющих различную структуру цепи нагрузки (параллельный, последовательно-параллельный, параллельно-последовательный контуры) и использующих в качестве источников питания автономные инверторы тока. Параметры рассматриваемых цепей соответствуют таковым в электротехнологиях индукционного нагрева, системе бесконтактного электрического транспорта.



При пуске инвертора тока возможно снижение времени, предоставляемого тиристорам для восстановления их запирающих свойств, и, как следствие, опрокидывание инвертора либо чрезмерное повышение уровня выходного напряжения в первых циклах коммутации. Установлено, что для параллельного инвертора тока зависимость угла запираания тиристоров в первом цикле коммутации  $\delta_1$  от угла  $\Omega_1$ , соответствующего первому межкоммутационному интервалу, имеет выраженный экстремум (рис. 6). Максимальным значениям  $\delta_1$  соответствуют оптимальные углы  $\Omega_{\text{опт}} = 1,0 - 1,3$  рад. Параметры контуров нагрузки и коммутации  $X_{L*}, \Theta$  оказывают существенное влияние на величину угла запираания  $\delta_1$  и мало влияют на оптимальные значения  $\Omega_{\text{опт}}$ . При пуске не достаточно увеличить угол запираания в одном или нескольких циклах коммутации. Устойчивость инвертирования определяется минимальным значением угла  $\delta_{\text{min}}$  на всем интервале пуска вплоть до установившегося режима. Предложен алгоритм управления, при котором  $\delta_{\text{min}} = \delta_1$ . Коммутацию тиристоров вплоть до выхода на установившийся режим осуществляют в момент достижения максимума напряжения на колебательном контуре нагрузки.

Качественно иной характер пускового процесса наблюдается в последовательно-параллельном инвертере тока. При определенных

параметрах компенсирующего конденсатора  $C_K$  угол запираания тиристоров в первых циклах коммутации превосходит его значение в установившемся режиме. Уменьшение емкости  $C_K$  сопровождается ростом угла запираания и увеличением нагряжения на тиристорах. Предложен алгоритм пуска, при котором  $\Omega_1 = \pi/2$  и далее  $\Omega_{i+1} + \Omega_{K(N-i)} = \pi$  ( $N = 2, 3, 4, \dots$ ). Показано, что разработанный способ управления при определенных параметрах компенсирующего конденсатора  $C_K$  обеспечивает минимальное значение угла запираания тиристоров, равное его значению в установившемся режиме.

Показано, что недостатки, присущие режиму работы системы бесконтактного электрического транспорта со стабильной выходной частотой преобразователя, могут быть устранены регулированием угла нагрузки  $\Phi_{II}$ , осуществляемым изменением частоты тока тяговой сети. Высокая чувствительность системы транспорта к изменению частоты определяет дополнительное условие регулирования: пределы изменения частоты должны быть минимальными. Это позволит обеспечить стабильные тяговые характеристики бесконтактных электропоездов. Сформулирована и решена задача оптимизации параметров цепи нагрузки системы транспорта. В качестве целевой функции принят обобщенный показатель  $P_{II}$ , учитывающий отклонения частоты  $\Delta f$  от номинального значения во всех режимах работы транспорта,  $P_{II}(\Delta f) \rightarrow \min$ . При этом учтены пределы изменения сопротивления нагрузки  $R_{II}$ , режимы работы электропоездов. В результате получены оптимальные параметры цепи нагрузки, обеспечивающие минимальные значения отклонений частоты тока. Недостаток режима стабилизации  $\Phi_{II}$  заключается в том, что отклонение параметров нагрузки от их оптимальных значений приводит к увеличению отклонений частоты, что усложняет процесс настройки тяговой сети.

Недостатки, присущие режимам работы тягового преобразователя со стабильной выходной частотой, со стабилизацией  $\Phi_{II}$ , осуществляемой изменением частоты, могут быть устранены при использовании системы регулирования  $\Phi_{II}$  с зоной нечувствительности. В определенном диапазоне изменения  $\Phi_{II}$  выходную частоту преобразователя поддерживают стабильной. За пределами диапазона частоту регулируют, обеспечивая ограничение  $\Phi_{II}$  на заданном уровне.

В системах с последовательным включением потребителей стабилизация тока в линии обеспечивает независимое регулирование мощностей отдельных потребителей, осуществляемое изменением их сопротивлений. Стабильность тока во всех режимах работы системы является причиной повышения потерь энергии в линии, уменьшения к.п.д. системы. Особенно ощутимы потери при большой длине линии. Решение проблемы состоит в том, чтобы отказаться от режима полной стабилизации тока, сохранив при этом независимость процессов регулирования мощностей отдельных потребителей. Здесь возможны два подхода: сужение области существования параметров нагрузки, в пределах которой обеспечивается режим стабилизации тока на номинальном уровне; исключение режима стабилизации тока на этом уровне во всем диапазоне изменения параметров нагрузки. Разработаны технические решения, позволяющие реализовать оба подхода. Предложено регулировать мощность потребителей изменением как их сопротивлений, так и тока в линии (рис. 7). Пусть ток в линии меньше его предельного уровня,

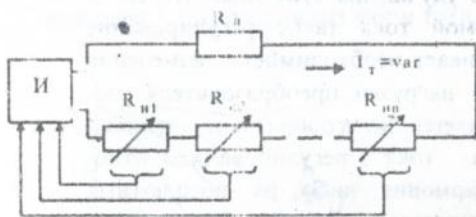


Рис. 7

обеспечивающего максимальное значение мощностей отдельных потребителей. Если в процессе регулирования мощности сопротивление одного из потребителей достигло максимального значения, а его мощность не достигла заданного уровня, то дальнейшее регулирование осуществляют изменением тока в последовательной цепи. Ток в линии увеличивают изменением напряжения на выходе источника питания до тех пор, пока мощность этого потребителя не достигнет заданного уровня. Для сохранения неизменными мощностей других потребителей при повышении тока в линии их сопротивления должны уменьшаться. Это реализуется замкнутыми системами автоматического регулирования, установленными на каждом потребителе. Информацию о достижении сопротивлением  $n$ -го потребителя его предельного значения передают по каналу связи в источник питания. При отсутствии такого сигнала ток в линии автоматически снижается с заданной скоростью.

Эффективность систем регулирования тока предложено оценивать относительным снижением мощности потерь в линии

$$P_{n*} = \frac{\xi^2 + S}{1 + S}.$$

Здесь  $\xi = I_{T1}/I_{T2}$ ,  $S = t_2/t_1$ ,  $I_{T1}, I_{T2}$  - дискретные уровни тока ( $I_{T2} > I_{T1}$ );  $t_1, t_2$  - суммарное время протекания ток в  $I_{T1}, I_{T2}$  соответственно.

Эффективность системы высока при малых значениях параметров  $\xi, S$ . Установлено, что снижение тока тяговой сети в системе бесконтактного электрического транспорта в режиме холостого хода приводит к уменьшению полной мощности, потребляемой преобразователем частоты. Существенно снижается активная мощность, в меньшей степени - реактивная.

В электротехнологиях, показатели эффективности которых имеют выраженную частотную зависимость, например в системах индукционного нагрева, при изменении параметров технологического процесса может возникнуть необходимость изменения частоты тока в широких пределах с целью улучшения этих показателей. В системах с синусоидальной формой тока также регулирование трудно реализуемо, так как возникает необходимость изменения частотных характеристик контура нагрузки преобразователя частоты. В этих условиях представляется целесообразным использование несинусоидальной формы тока с регулированием отношения мощностей отдельных гармоник либо их абсолютных значений. При использовании импульсной формы тока регулирование обеспечивается изменением длительности импульсов и реализуется системой управления преобразователя. Предложенный подход к регулированию раскрывает возможность для качественно нового управления технологическими процессами. Применительно к системам индукционного нагрева такое регулирование позволит реализовать режимы, близкие к изменению частоты тока синусоидальной формы, обеспечив при этом высокие энергетические показатели процесса, позволит сформировать заданную картину распределения температуры в поперечном сечении заготовки.

Для успешного решения задач регулирования при использовании разработанного подхода важно иметь простой алгоритм расчета мощности и ее гармонических составляющих в цепи нагрузки, позволяющий на основе единых принципов выполнять расчет этих параметров для наиболее распространенных схем инверторов и нагрузок. Разработана методика расчета параметров, базирующаяся на замене реальной формы импульсов тока нагрузки более простой: в резонансных инверторах - синусоидальной в инвер-

торах тока - прямоугольной. В отличие от аналогичных допущений при изучении процессов в автономных инверторах  $\pi$ , данные допущения используются для расчета параметров режима работы цепей электротехнологической нагрузки. Получены аналитические выражения для расчета отношений активной мощности к мощности  $n$ -й гармоники ( $P/P_n$ ), мощностей  $j$ -й и  $n$ -й гармоник тока ( $P_j/P_n$ ). Так для отношения  $P_j/P_n$  справедливо:

$$\frac{P_j}{P_n} = \frac{(Z_j/Z_{rj})^2 I_{j0}^2}{(Z_n/Z_{rn})^2 I_{n0}^2}$$

Здесь  $I_{j0}$ ,  $I_{n0}$  - относительные действующие значения токов  $j$ -й и  $n$ -й гармоник на выходе преобразователя;  $Z_j$ ,  $Z_n$  - полные сопротивления нагрузки на частотах  $j$ -й и  $n$ -й гармоник,  $Z_{rj}$ ,  $Z_{rn}$  - полные сопротивления ветви, содержащей  $R_n$  на частотах  $j$ -й и  $n$ -й гармоник.

Рис. 8 иллюстрирует зависимость  $I_{n0}$  от угла проводимости вентилей  $\lambda$  для различных форм тока.

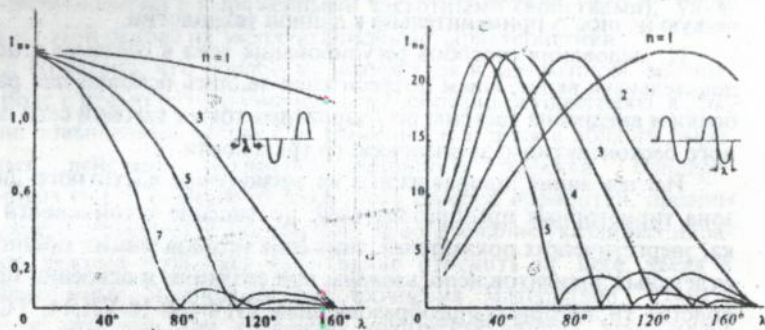


Рис. 8

**Шестая** глава посвящена экспериментальным исследованиям и промышленному внедрению результатов работы.

Важным показателем эффективности разработочного способа обработки материалов в магнитном поле является энергоёмкость процесса обработки. Предложена методика экспериментального определения мощности потерь энергии в обрабатываемом материале. Основу методики составляет условие баланса активных мощностей на входе и выходе источника питания. Методика использована для оценки уровня потерь энергии в железной руде при ее обработке. В

результате экспериментальных исследований получена аналитическая зависимость, позволяющая рассчитать удельную мощность потерь при заданных параметрах магнитного поля и обрабатываемого материала,  $P_{ок} = k \alpha f B_m^2$ ,

где  $k$  - коэффициент пропорциональности, зависящий от свойств обрабатываемой руды;  $\alpha$  - процентное содержание железа в руде;  $B_m$  - амплитудное значение магнитной индукции.

Разделение потерь на гистерезис и вихревые токи, выполненное на основе экспериментальных исследований процесса обработки железной руды, свидетельствует о существенном преобладании потерь на гистерезис.

Теоретические и экспериментальные исследования нового способа обработки материалов в магнитном поле послужили основой создания экспериментального образца промышленной установки, обеспечивающей разупрочнение железной руды перед измельчением в шаровой мельнице. Создание образца и исследование его характеристик в лабораторных и производственных условиях позволили уточнить приемлемые электрические и технологические параметры процесса обработки, оценить эффективность способа и его практическую ценность применительно к данной технологии.

Исследования способов регулирования тока в системах с последовательным включением потребителей явились основой для разработки и внедрения системы регулирования тока в тяговой сети шахтного бесконтактного электрического транспорта.

Исследования, направленные на расширение частотного диапазона тиристорных преобразователей, повышение устойчивости пуска, энергетических показателей, снижение установленных мощностей отдельных элементов, использованы при создании и освоении производства тиристорных преобразователей ТПЧ-100-10-УХЛ4, ТОВ 1-160-1,2-4000 УХЛ4 для электротехнологий индукционного нагрева, бесконтактного электрического транспорта.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе осуществлено научное обоснование технических и технологических решений, реализация которых обеспечивает эффективные режимы работы электротехнологических комплексов тока повышенной частоты, что является существенным вкладом в научно-технический прогресс. Основные выводы, научные и практические результаты заключаются в следующем:

1. Разработаны и сформулированы общие подходы и принципы формирования режимов работы электротехнологических комплексов тока повышенной частоты, реализующие комплексный характер исследования систем. Сформулированные принципы отражают приоритетный характер некоторых режимов, связанных с расширением функциональных возможностей комплексов, качественным изменением характера технологических процессов. Разработанные подходы раскрывают механизм синтеза наиболее характерные особенности в процедуре формирования режимов. Режимы работы комплекса формируют с учетом показателей качества технологического процесса и комплекса в целом. Комплекс условно расчленяют на составляющие (преобразователь частоты и электротехнологическая нагрузка) и выделяют в качестве промежуточных выходные параметры преобразователя частоты. Применение указанных принципов и подходов позволило синтезировать параметры режима работы нескольких разновидностей комплексов, обладающих общими свойствами (систем с широкими пределами изменения параметров нагрузки, с исследовательским включением потребителей, комплексов обработки материалов в магнитном поле, электротехнологий с выраженными частотными свойствами), улучшить на этой основе их эксплуатационные характеристики.

2. Показано, что обработку материалов в переменном магнитном поле с целью разупрочнения целесообразно осуществлять в диапазоне повышенных частот с напряженностью поля в области выраженных действий магнитоэрикссионного эффекта, пондеромоторных сил. В отличие от известного способа обработки, предполагающего термическое воздействие, использование указанных параметров режима позволяет качественно изменить процесс, введя в действие иные механизмы разупрочнения материалов. Способ является основой для создания энергосберегающих технологий промышленной дезинтеграции руд полезных ископаемых. В частности, разработана новая технология обработки железной руды перед измельчением в шаровой мельнице. Ее применение позволяет снизить энергоемкость процесса, повысить качество измельченного продукта. Дано обоснование структурного построения системы "соленоид-обрабатываемый материал". Система отличается от известных устройств, использующих для создания магнитного поля соленоид, конструктивным исполнением, параметрами обрабатываемого материала. Рассмотрены особенности режимов работы источника питания в электротехнологическом комплексе обработки железной руды в магнитном поле, предложены варианты

его реализации на основе систем индивидуального и централизованного питания.

3. Получила развитие теория электротехнологических комплексов тока повышенной частоты как особого класса резонансных высокодобротных нелинейных электрических цепей, заключающаяся в исследовании специфичных режимов работы этих комплексов, обусловленных расширением их функциональных возможностей, качественным изменением характера технологических процессов, применением новых структурных построений и изменением параметров элементов силового электрооборудования, использованием новых способов управления и регулирования, получении неизвестных ранее функциональных зависимостей, описывающих исследуемые процессы, осуществляемое на основе разработанных математических моделей для анализа стационарных процессов в цепях электротехнологической нагрузки (системы обработки материалов в магнитном поле) и источника питания (автономные инверторы с совмещенными функциями силовых элементов, с умножением частоты), а также моделей для исследования пусковых процессов в электротехнологических комплексах (системы индукционного нагрева). Математические модели и результаты моделирования явились основой для решения задач параметрической оптимизации, разработки методик инженерного расчета электротехнологического оборудования.

4. Разработаны методологические принципы оптимизации системы "соленоид-обрабатываемый материал", заключающиеся в формировании обобщенного критерия, учитывающего показатели эффективности как технологического процесса, так и комплекса в целом, выделении области оптимальных параметров, в пределах которой значение целевой функции близко к экстремальному, что расширяет возможности в выборе этих параметров, создает предпосылки к упрощению конструкции системы, улучшению энергетических и массогабаритных показателей. Сформулирована и решена многокритериальная задача оптимизации конструктивных, технологических и электрических параметров системы. Установлено, что длина соленоида мало влияет на значение целевой функции, что позволяет реализовать вариант безтрансформаторного согласования параметров источника питания и нагрузки. Показано, что снижение энергоёмкости процесса обработки достигается увеличением напряженности магнитного поля при одновременном уменьшении количества циклов нагружения. Установлено, что обработку материалов, показатели разупрочнения которых

существенно зависят от градиента напряженности магнитного поля, целесообразно выполнять в секционированном соленоиде. Результаты оптимизации позволяют реализовать режимы обработки, обеспечивающие максимальный коэффициент разупрочнения материала при минимальной энергоемкости процесса.

5. Разработаны методики расчета параметров электротехнологического оборудования исследуемых комплексов:

- Методика расчета электрических систем "соленоид - обрабатываемый материал". Методика ориентирована на безтрансформаторное согласование нагрузки с преобразователем частоты и позволяет реализовать режимы работы, отвечающие принятым критериям эффективности;

- Обобщенная методика расчета инверторов с умножением частоты. В основу методики положены два подхода к выбору длительности импульсов тока, воздействующих на цепи нагрузки: по условию обеспечения заданной нагрузочной способности полупроводниковых вентилях, а также заданного коэффициента гармоник выходного напряжения;

- Методика расчета мощности и ее гармонических составляющих в цепях электротехнологической нагрузки с несинусоидальной формой тока. Методика базируется на замене реальной формы импульсов тока нагрузки более простой: в резонансных инверторах - синусоидальной, в инверторах тока - прямоугольной. Методика позволяет выполнять расчет параметров для наиболее распространенных схем инверторов и структурных построений цепей нагрузки.

6. Установлено, что при пуске электротехнологических комплексов индукционного нагрева материалов, использующих параллельный или последовательно-параллельный автономные инверторы тока, изменение длительностей межкоммутационных интервалов в процессе управления тиристорами позволяет увеличить углы их запитания. Предложены алгоритмы пуска, реализующие указанный принцип повышения устойчивости инвертирования. Показано, что формирование заданной области существования параметров нагрузки тягового преобразователя частоты в системе бесконтактного электрического транспорта может быть обеспечено регулированием угла  $\Phi_n$ , осуществляемым изменением выходной частоты преобразователя. Это позволяет исключить режимы работы системы с низкой устойчивостью инвертирования и малым коэффициентом мощности цепи нагрузки.

7. Показано, что в системах с последовательным включением потребителей и независимым регулированием их мощностей наряду с частичным возможно полное исключение режима стабилизации тока в линии. Разработан способ независимого регулирования мощностей, заключающийся в том, что регулирование осуществляют как изменением сопротивлений потребителей, так и тока в линии. При этом значение тока зависит от мощности наиболее нагруженного потребителя. Регулирование позволило уменьшить потери энергии в тяговой сети бесконтактного транспорта.

8. В электротехнологиях, показатели эффективности которых имеют выраженную частотную зависимость, в определенных условиях, связанных с изменением параметров технологического процесса, представляется целесообразным использование несинусоидальной формы тока с регулированием отношения мощностей отдельных гармоник, их абсолютных значений. Это позволит реализовать режимы работы систем, близкие к трудноосуществимому плавному изменению в широких пределах частоты синусоидального тока. Предложенный подход к регулированию раскрывает возможности для качественно нового управления технологическими процессами, использующего действия гармонических составляющих тока. В системах индукционного нагрева такое регулирование позволит повысить энергетические показатели процесса, сформировать заданную картину распределения температуры в поперечном сечении заготовки. Разработаны способы регулирования мощностей, предполагающие изменение длительности импульсов тока, воздействующих на цепи нагрузки.

9. Выполнены экспериментальные исследования, подтверждающие обоснованность принятых в работе исходных положений и допущений, достоверность полученных результатов, эффективность разработанных технических и технологических решений. Исследования процесса обработки железной руды в магнитном поле свидетельствуют о том, что эффект разуплотнения обеспечивается как действием магнитострикции, так и пондеромоторных сил; в диапазоне повышенных частот потери на вихревые токи практически отсутствуют. Подтверждена экспериментально эффективность разработанной технологии обработки железной руды в магнитном поле перед измельчением в шаровой мельнице. Результаты промышленного эксперимента, проведенного на технологической линии первой стадии измельчения Южного горно-обогатительного комбината, свидетельствуют об увеличении удельной производительности мельницы (1,5 %), о снижении циркулирующей нагрузки

(5 %), приросте содержания железа в магнитной фракции (0,1-0,4 %). Внедрение на шахте "Лутугинская" ПО "Луганскуголь" системы регулирования тока позволило уменьшить потери энергии в тяговой сети на 46 %.

10. Результаты выполненных теоретических и экспериментальных исследований позволили создать электротехнологические комплексы и системы, использующие разработанные автором технические решения, и внедрить их в производство. НПО "Электротехника" (г.Таллинн) освоило серийный выпуск преобразователей частоты ТПЧ-100-10-УХЛ4, предназначенных для питания систем тока повышенной частоты, в частности, комплексов индукционного нагрева материалов (плавка,ковка,штамповка,закалка и др.). Внедрены и эксплуатируются на шахтах "Известия" ПО "Донбассантрацит", "Лутугинская" ПО "Луганскуголь" комплексы бесконтактного электрического транспорта с источниками питания ТОВ1-160-1,2-4000 УХЛ4, выпускаемыми НПО "Электротехника". Опыт эксплуатации комплексов на шахтах Донбасса, металлургических и машиностроительных предприятиях свидетельствует об их работоспособности, эффективности, правильности полученных в диссертации выводов и результатов. Выполняются работы по освоению серийного выпуска этого электрооборудования предприятиями Украины.

#### Основные публикации по теме диссертации

1. Транспорт с индуктивной передачей энергии для угольных шахт / Г.Г.Пивняк, И.П.Ремизов, С.А.Саратикянц, С.И.Выпанасенко и др. Под ред. Г.Г.Пивняка. - М.: Недра, 1990. - 245 с.

2. Выпанасенко С.И. Автономные инверторы с смещенными функциями силовых элементов // Техн.электродинамика.- 1993.-N4.- С. 24-27.

3. Выпанасенко С.И. Автономные инверторы с умножением частоты // Техн.электродинамика.- 1992.-N 6. - С. 23-31.

4. Выпанасенко С.И. Задающий генератор системы управления инвертора для шахтного бесконтактного электрического транспорта // Горная электромеханика и автоматика :Респ.межвед.науч.сб.,1985, вып. 47.- С. 11-16.

5. Выпанасенко С.И. Инвертор тока в преобразователе частоты шахтного бесконтактного электротранспорта // Горная электромеханика и автоматика :Респ.межвед.науч.сб., 1989, вып. 54. - С. 8-11.

6. Выпанасенко С.И. Переходные процессы при пуске инвертора системы бесконтактного рудничного транспорта // Методы и средства повышения эффективности устройств преобразовательной техники. - Киев, 1981. - С. 119-124.

7. Выпанасенко С.И. Расчет активной мощности в инверторе с импульсной формой тока // Силовая электроника в решении проблем ресурсо- и энергосбережения / Тез.докл. на Междунар. науч. конф., г.Алушта, окт. 1993г. - Харьков, 1993. - С. 44-46.

8. Выпанасенко С.И. Функциональные возможности инверторов с импульсной формой тока // Проблемы преобразовательной техники / Тез.докл. на Всесоюзн.науч.конф., г.Чернигов, сент.1991г. - Киев, 1991, ч.1. - С. 86-88.

9. Выпанасенко С.И. Энергетические показатели шахтного тягового преобразователя частоты на базе автономного инвертора тока // Горная электромеханика и автоматика: Респ.межвед. науч.сб., 1989, вып. 55. - С. 5-7.

10. Пивняк Г.Г., Выпанасенко С.И., Мирошниченко В.А. Управление инверторами тока в пусковых режимах // Техн. электродинамика.- 1989-№ 3. - С. 49-52.

11. Пивняк Г.Г., Выпанасенко С.И. Оптимизация параметров тягового преобразователя частоты // Техн.электродинамика.-1985-№ 1.- С. 29-33.

12. Пивняк Г.Г., Выпанасенко С.И. Повышение устойчивости пуска параллельного инвертора тока // Техн.электродинамика.-1985-№ 2. - С. 40-44.

13. Пивняк Г.Г., Выпанасенко С.И. Повышение энергетических показателей тягового преобразователя частоты // Электротехника. - 1985-№ 5. - С. 34-35.

14. Пивняк Г.Г., Выпанасенко С.И. Преобразователь частоты с последовательно включенными потребителями // Применение в технологических процессах машиностроительного производства полупроводниковых преобразователей частоты / Тез.докл. на Всесоюзн.науч.конф., г.Уфа, май 1980г. - Уфа, 1980. - С. 13-14.

15. Пивняк Г.Г., Выпанасенко С.И. Пути совершенствования тиристорных преобразователей частоты для индукционного нагрева материалов // Техн.электродинамика.- 1992-№ 2. - С. 32-36.

16. Пивняк Г.Г., Выпанасенко С.И., Швец П.И. Алгоритм пуска параллельного инвертора тока // Проблемы преобразовательной техники / Тез.докл. на Всесоюзн.науч.конф., г.Киев, сент.1987г. - Киев, 1987, ч.3. - С. 212.

17. Пивняк Г.Г., Выпанасенко С.И., Червинский Е.В. Согласование параллельного инвертора тока с тяговой сетью бесконтактного транспорта // Горная электромеханика и автоматика: Респ. межвед. науч. сб., 1983, вып. 43. - С. 25-29.

18. А.с. 1267568 СССР. Преобразователь постоянного тока в переменный / Г.Г.Пивняк, С.И.Выпанасенко, И.И.Пресмани. - Оpubл. в Б.И., 1986, N 40.

19. А.с. 1283916 СССР. Способ пуска параллельного инвертора тока / Г.Г.Пивняк, С.И.Выпанасенко, П.И.Швец. - Оpubл. в Б.И., 1987, N 2.

20. А.с. 1769325 СССР. Способ регулирования мощности двухзвенного преобразователя частоты / С.И.Выпанасенко, Г.Г.Пивняк. - Оpubл. в Б.И., 1992, N 38.

21. А.с. 1654952 СССР. Способ регулирования тока нагрузки инвертора / С.И.Выпанасенко, Г.Г.Пивняк. - Оpubл. в Б.И., 1991, N 21.

22. А.с. 1614084 СССР. Способ управления инвертором / Г.Г.Пивняк, С.И.Выпанасенко, В.А.Мирошниченко, А.Р.Ковалев, А.Л.Аникин. - Оpubл. в Б.И., 1990, N 46.

23. А.с. 1175012 СССР. Способ управления инвертором / Г.Г.Пивняк, С.И.Выпанасенко, Е.В.Червинский, Е.И.Беркович, И.И.Пресмани. - Оpubл. в Б.И., 1985, N 31.

24. А.с. 1474791 СССР. Способ управления инвертором тока / Г.Г.Пивняк, С.И.Выпанасенко, В.А.Мирошниченко. - Оpubл. в Б.И., 1989, N 5.

25. А.с. 1467714 СССР. Способ управления тиристорным последовательно-параллельным резонансным инвертором / Г.Г.Пивняк, С.И.Выпанасенко, И.И.Пресмани. - Оpubл. в Б.И., 1989, N 11.

26. А.с. 1815770 СССР. Устройство для управления преобразователем частоты / Г.Г.Пивняк, С.И.Выпанасенко, А.Р.Ковалев, Е.М.Эрлих. - Оpubл. в Б.И., 1993, N 18.

27. Патент 1811421 СССР. Способ обработки материалов / Г.Г.Пивняк, Е.Г.Баранов, С.И.Выпанасенко, А.Е.Войтенко, И.Н.Докучаева. - Оpubл. в Б.И., 1993, N 15.

Личный вклад автора заключается в развитии теории электро-технологических комплексов тока повышенной частоты, синтезе параметров режимов на основе разработанных принципиальных подходов, участии в экспериментальных исследованиях и опытно-конструкторских работах по созданию комплексов. В работах, написанных в соавторстве, личный вклад автора состоит:

[10, 11, 12, 13, 16, 17.] - в разработке подходов к оптимизации параметров комплексов в пусковых и стационарных режимах, выводе основных соотношений, характеризующих их режимы функционирования, решении оптимизационных задач и анализе полученных результатов;

[14, 15] - в создании новых подходов к формированию режимов работы комплексов.

В работах [18-27] вклады соавторов равнозначны.

## АННОТАЦИЯ

Выпанасенко С.И. Электротехнические комплексы тока повышенной частоты для технологий и транспорта (развитие теории, синтез параметров, разработка).

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.03 - электротехнические комплексы и системы, включая их управление и регулирование, Государственная горная академия Украины, Днепропетровск, 1995.

Защищается 42 научных работы, 19 авторских свидетельств и патентов, которые содержат результаты теоретических и экспериментальных исследований режимов функционирования электротехнических комплексов тока повышенной частоты. Синтезированы параметры режима работы комплексов, обладающих общими свойствами. Созданы устройства, обеспечивающие их реализацию.

Vipanasenko S.I. Electric technical complexes higher frequency currents for technologies and transport (theory, parameter synthesis, developments).

Doctor of Science Degree thesis work on speciality 05.09.03 - Electric Engineering Complexes Including Their Control and Regulation, State Mining University of Ukraine, Dnepropetrovsk, 1995.

42 published scientific works and 19 patents containing results of theoretical and experimental research of functioning regimes of electric technical complexes using higher frequency currents are supported. Regime parameters for complexes with mutual properties have been synthesized. Devices realizing these parameters have been developed.

Ключові слова: електротехнологія, електробладнання, управління.



Выпанасенко Станислав Иванович

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ ТОКА  
ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЙ  
И ТРАНСПОРТА  
(РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ, СИНТЕЗ ПАРАМЕТРОВ. РАЗРАБОТКА)

/ Автореферат /

Подписано в печать 14.02.95 г. Формат 60x84/16.  
Бум.тип. № 3. Офс.печ. Усл. печ. л. 2.0. Уч.-изд.л.2.0  
Тираж 100 экз. Заказ № 30. Бесплатно.

Ротапринт ГГА Украины, 320027,  
Днепропетровск, пр. К.Маркса, 19

448063



ABCS.OTS

448063

AB 32.012