

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

На правах рукописи

ПИВОВАРОВ ЛЕВ ВЛАДИМИРОВИЧ

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА КОНТРОЛЯ И
УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ЭЛЕКТРОПРОВОДНЫХ
СРЕД В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

05.09.05 - теоретическая электротехника

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

Министр.

Диссертация

в форме научного доклада на соискание
ученой степени доктора технических наук

Киев - 1992



00819728 (Z)

Работа выполнена в Харьковском
Славянском государственном
электродинамики АН Украины

Научный консультант: доктор технических наук, профессор Борисов Б.П.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Ю.П.Емец

доктор технических наук, профессор С.Т.Толмачев

доктор технических наук Е.В.Дмитриев

Ведущая организация Старокраматорский машиностроительный завод

Защита состоится "28" сентября 1992 г. в 11 час.,
на заседании специализированного совета Д 016.30.03 при
Институте электродинамики АН Украины, (252680, г.Киев-57,
Проспект Победы, 56), тел. спецсовета: 446-91-15

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института
электродинамики АН Украины

Диссертация в форме научного доклада разослана
" " _____ 1992г.

Ученый секретарь
специализированного совета

В.С.Федий

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Исследуемая в работе проблема связана с разработкой новых схем и конструкций электромагнитных (ЭМ) устройств индукционного и кондукционного типов, предназначенных для контроля и управления процессами, протекающими в технологических системах с искусственными или естественными электропроводными контурами. Рабочая среда в контуре может находиться в твердой, жидкой, газообразной фазах, или в состоянии плазмы. Такие технологические системы встречаются практически во всех отраслях народного хозяйства - в металлургии, химической промышленности, ядерной и МГД-энергетике, криогенной технике, медицине, биологии и др., при этом параметры среды контура (электропроводность, вязкость, плотность, магнитная проницаемость, температура) в зависимости от назначения системы отличаются весьма значительно. Технологические системы с электропроводными контурами имеют ряд известных преимуществ, весьма перспективны, и потребность народного хозяйства в ЭМ-устройствах велика.

Широкий круг физических и химических явлений, которые необходимо рассматривать комплексно при научных исследованиях процессов, происходящих в электромагнитном устройстве для технологической системы с электропроводным контуром, многообразие типов, вариантов схем и конструкций ЭМ-устройств создают определенные трудности исследований, необходимых для прогнозирования эксплуатационных характеристик и рабочих параметров устройств. Сложность проблемы еще и в том, что физические процессы в рассматриваемых устройствах описываются сложной системой дифференциальных уравнений электродинамики, гидродинамики, термодинамики, а также уравнениями химических реакций, если электропроводная среда является, например, водным раствором солей, кислот, щелочей. Поэтому неизбежно применение упрощающих математических и физических моделей на различных уровнях приближения. Взгляды автора диссертации сводятся к тому, что на стадии начального проектирования нет смысла учитывать те переменные, которые не играют основной роли или не важны. И хотя иногда полезно оптимизировать конструкцию, часто более целесообразно знать чувствительность оптимизируемых параметров к изменению других переменных, а также предусмотреть последствия оптимизации. Часто оказывается, что добывать-

ся высокой точности решения уравнений или оптимизации параметров конструкций ЭМ устройств нецелесообразно. Иногда весьма полезны методы предварительного расчета некоторых параметров устройства и оценка влияния их друг на друга, например, с помощью приближенных интегральных характеристик.

В работах автора поставлен и решен комплекс конкретных научных проблем по разработке на уровне изобретений и исследованию новых типов электромагнитных устройств, проведен теоретический и экспериментальный анализ происходящих в них процессов, разработаны инженерные методики их расчета. Созданы действующие модели и опытно-промышленные образцы различных вариантов ЭМ устройств.

Исследования выполнялись в соответствии с Основными направлениями развития естественных наук АН СССР по комплексной проблеме "Научные основы электрофизики и электроэнергетики", Распоряжениями Президиума АН УССР в рамках координационных планов НИР АН УССР по проблеме "Преобразование параметров электрической энергии" и комплексной проблеме "Научные основы электроэнергетики", заданиями республиканской целевой комплексной программы РН.01.07.Ц.01.08, а также темами НИР Института электродинамики АН Украины "Расплавы", "Шторм", "Волна".

Цель работы представляет разработку, исследование и создание электромагнитных устройств для контроля и управления параметрами электропроводных сред в контурах технологических систем.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Новые методы электромагнитного измерения и контроля скорости и расхода электропроводной среды – метод синхронизации, и метод разделения индуктированной ЭДС на ЭДС движения и ЭДС трансформации.
2. Предложение об использовании в качестве носителя информации о скорости электропроводной среды комплексной функции: отношения "векторов" ЭДС движения и ЭДС трансформации.
3. Новые методы и схемы преобразования нелинейной информационной или энергетической функции в линейную функцию (характеристику) с помощью схемных элементов – скалора, ротатора, рефлектора, мутатора.
4. Результаты теоретических и экспериментальных исследований различных типов электромагнитных устройств, а именно: ЭМ-затвора

соленоидального типа, ЭМ устройства с осевым током и тороидальными согласующими трансформаторами, модуль бесконтактной трехфазной обмотки (БТО) и др.

5. Результаты теоретических исследований эффекта продольного намагничивания электропроводной среды, скользящей по оси соленоидального поля в каналах постоянного и переменного сечения.

6. Результаты решения комплекса научных проблем, связанных с повышением эффективности работы индукционных ЭМ устройств.

7. Результаты решения комплекса проблем, связанных с разработкой и исследованием кондукционных электромагнитных устройств с электропроводной средой в канале.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается хорошей сходимостью результатов аналитических методов исследования с экспериментальными данными, полученными на моделях в лабораторных условиях и экспериментальных образцах в промышленных условиях, внедрением некоторых методов и устройств в практику, широкой апробацией научных положений.

Методология и методы исследования. При теоретических исследованиях использовались различные приближенные методы решения системы уравнений электродинамики и МГД-уравнений. Экспериментальные исследования по проверке теоретических положений выполнялись на физических моделях в лабораторных условиях и на экспериментальных образцах в промышленности. Разработанный автором "Стенд испытательный" / 21 / позволил проводить высокоточные исследования режимов работы электромагнитных устройств в широком диапазоне частот токов возбуждения и скоростей движения электропроводной среды.

Научная новизна результатов выполненной работы заключается в следующем.

1. Разработаны теория и метод электромагнитного измерения скорости движения электропроводной среды с помощью синхронизации управляемого скольжения или частотой тока возбуждения источника бегущего магнитного поля, позволяющие проектировать электродинамические устройства, обладающие повышенной точностью и надежностью. Получены критериальные коэффициенты и характеристики, необходимые при проектировании таких устройств. Разработаны и исследованы варианты управляемых источников бегущего магнитного поля.

2. Разработаны основы теории и предложены методы электромаг-

нитного измерения скорости движения и расхода электропроводной среды с помощью пульсирующего магнитного поля, отличающиеся в раздлении индуктированной в измерительной катушке индуктивности информационной ЭДС движением среды на две составляющие: ЭДС движения и ЭДС трансформации, не зависящей от движения. На основании теоретических исследований получены характеристики устройства, критериальные коэффициенты чувствительности и погрешности. Изобретены и защищены авторскими свидетельствами варианты конструкции электромагнитных измерителей скорости и расхода (длины).

3. Разработана и исследована эквивалентная схема замещения электромагнитного расходомера. Изготовлены и внедрены промышленные образцы устройства. Поставлена проблема линеаризации выходных характеристик приборов, разработаны рекомендации по их эксплуатации.

4. Проблема линеаризации выходных характеристик электромагнитных устройств, поставленная в работе / 2 /, получила дальнейшее свое развитие на основе схемных элементов: скалоров, ротаторов, рефлекторов, мутаторов. Исследуя эту проблему, автор разработал преобразователи нелинейных характеристик устройства в линейные (ПНЛ) по параллельной и последовательной схемам. Предложены и исследованы функционально аналогичные механические схемные элементы и механический ПНЛ. Возможно построение пневматических и гидравлических схемных элементов. Исследованы способность ПНЛ подавлять или фильтровать высшие гармонические токи или напряжения в электрических цепях большой мощности, и эффективность его работы / 3 /.

5. Проведенные классификация и сравнительный анализ ЭМ устройств показал, что в технологических системах с жидким электропроводным контуром наиболее целесообразно применять осесимметричные конструкции устройств с осесимметричными полями.

6. Разработаны и предложены новые конструкции электромагнитных устройств с осевой симметрией тока и поля, проведены теоретические и экспериментальные исследования этих устройств, предложены и исследованы схемы и устройства согласования - бесконтактные "обмотки" в одно- и трехфазном вариантах, что позволило определить влияние электромагнитного экранирования электропроводной среды на характеристики устройств.

7. Предложен и реализован метод исследования осесимметричного поля с помощью точно известной аналитической скалярной или векторной функции распределения характеристики поля вдоль оси симметрии.

8. Впервые проведены теоретические и экспериментальные исследования осесимметричного электромагнитного расходомера, разработаны и изготовлены опытно-промышленные образцы.

9. Рассмотрены электромеханические и тепловые аспекты кондукционного электромагнитного устройства в системе с жидкостным электропроводным контуром низкой удельной проводимости, зависящей от температуры. Получено аналитическое решение в виде интегральных характеристик кондукционного ЭМ-устройства, с помощью которых проведено исследование схем и конструкции кондукционного насоса, гидромагнита, электромагнитного измерителя скорости и магнитогидродинамического генератора. Впервые кондукционное устройство исследовано в режиме стационарного и импульсного магнитных полей.

10. Предложены и разработаны на уровне изобретений новые конструкции осесимметричных ЭМ устройств управления параметрами потока жидкостного контура.

Практическая ценность. Разработанные методы контроля скорости и управления параметрами потока электропроводной среды весьма перспективны, охватывают многочисленные отрасли народного хозяйства. Применение их повышает эффективность и экономичность технологических процессов, систем и автономных электромагнитных устройств. Использование научных положений, обоснованных в работе, позволяет проводить оценку различных вариантов исполнительных структур, исследованного в диссертации класса электротехнических устройств с помощью полученных зависимостей, таблиц, номограмм, определять области рационального применения тех или иных решений при разработке технологических систем с электропроводными контурами.

Реализация результатов работы. В результате выполненных в лабораториях Украинского заочного политехнического института (УЗПИ), в лабораториях Славянского Государственного педагогического института (СГПИ) и Института электродинамики АН Украины под руководством и непосредственным участии автора научных исследований разработаны и испытаны в промышленных условиях экспериментальные образцы электромагнитных измерителей скорости и "расхода" (длины) алюминиевого листового проката, новизна разработок которых подтверждается авторскими свидетельствами. Физические модели, лабораторные макеты и промышленные образцы ЭМ-устройств прошли предварительные испытания на разработанном и изготовлен-

ном автором специальным "Стенде испытательном" / 21 /. Некоторые результаты работы, а именно: методы анализа, синтеза и практической реализации согласующих устройств / 22 /; системы для обрезки кромок листов / 18, 20 / внедрены в практику проектирования листопркатных станков 3600, на машине литья под давлением типа МОД ДУ 711808; на кромкообрезных ножницах № 5 толстолистого стана 3600, в системе АЛС поезда на магнитной подвеске. Весьма перспективным является внедрение в проектно-конструкторские разработки ЭМ-устройств для технологических систем с жидкостными контурами, выполненные совместно с учеными ИЭД АН Украины для различных отраслей народного хозяйства.

Внедрение разработанных методов анализа и синтеза электромагнитных устройств и согласующих блоков упрощает выбор устройства с необходимыми характеристиками и заданными конструктивными параметрами и позволяет избавиться от излишних затрат на поиски методов и предварительные исследования.

Внедрение методов практической реализации некоторых типов ЭМ-устройств в проектно-конструкторские разработки КВ ЦШ МПС, НКМЗ (г.Краматорск), КМЗ (г.Краматорск), позволяет повысить эффективность и функциональную надежность работы технологической системы с электропроводным контуром, уменьшает время простоя оборудования, уменьшает текущие затраты.

Как показывают расчеты экономической эффективности, подтвержденные актами внедрения предприятиями-заказчиками, годовая эффективность внедрения в рабочем проекте толстолистого стана 3600 (п/я Р6702) составляет 300 тыс.руб. в год. Внедрение электромагнитного измерителя скорости (ЭМИС) на одной машине литья под давлением (завод ЛИТМАШ, г.Тирасполь), дает годовой экономический эффект 50 тыс.руб., а от внедрения модернизированного ЭМИС годовая прибыль составила 22 тыс.руб. Фактическая экономическая эффективность от внедрения ЭМИС на литейных машинах согласно данным завода ЛИТМАШ, за два года составила 120 тыс.руб.

Внедрение электромагнитных устройств в различных технологических системах с электропроводным контуром обеспечивает культуру производства, повышает надежность работы, снижает брак и уже сейчас дает ощутимый экономический эффект. Поскольку технологические системы и автономные устройства с электропроводными кон-

турами весьма перспективны, можно ожидать, что экономический эффект от внедрения исследованных в работах ЭМ устройств окажется в перспективе значительным.

Апробация работы. Основные положения диссертации неоднократно докладывались, обсуждались и получили одобрение на научно-технических конференциях Краматорского индустриального института, УЗПИ, МЭИ, СГПИ, семинаре "Оптимизация систем питания и электрооборудования электротехнологических установок" I ученого совета АН Украины по комплексной проблеме "Научные основы электроэнергетики".

Публикации. По результатам исследований соискателем лично и в соавторстве опубликованы: 4 монографии, 29 статей, 18 докладов, получено 15 авторских свидетельств на изобретения и 3 патента (Великобритания, ФРГ, США).

СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Главные принципы работы электромагнитных устройств для управления параметрами потока электропроводной среды были известны со времени Ампера и Фарадея: в электропроводной среде с удельной проводимостью γ , движущейся со скоростью $\vec{v}$ в магнитном поле с индукцией $\vec{B}$, возникает электрическое поле, напряженность которого $\vec{E} = [\vec{v} \vec{B}]$ возбуждает токи проводимости плотностью $\vec{G} = \gamma \vec{E}$ и электромагнитную объемную силу $[\vec{G} \vec{B}]$. Уже через год после открытия закона электромагнитной индукции (1831г.) Фарадей доложил о безуспешной попытке изменить напряжение поперек реки Темзы, индуцированное при движении воды относительно вертикальной составляющей магнитного поля Земли. Эксперименты Фарадея не удалась потому, что большая доля полезного сигнала замыкалась через дно реки Ватерлоо, с моста которой были опущены два больших электрода. Но уже в 1851 г. Волластону удалось измерить напряжение, индуцированное приливными течениями. Следующее практическое использование ЭДС, возникающей в жидкости при ее движении в магнитном поле, произошло в 1917 году. Смит и Слепян запатентовали схему для определения скорости корабля по измерениям разности потенциалов между двумя электродами на корпусе при наличии магнитного поля, источник которого находился на корабле. С 1920 года многие океанографы изучают морские течения, волны и приливы при помощи индуцированной разности потенциалов между электродами, которые прикрепляются

к кораблю или морскому дну. Несколько позже стало ясно, что электромагнитные измерения в потоке могут быть применены к жидкостям, находящимся в искусственных условиях — текущим по каналам и трубам.

Вскоре электромагнитную индукцию для регистрации мгновенной картины течения крови в артериях применили физиологи (Фабри, Коллин). Дальнейший этап в развитии электромагнитных расходомеров связан с появлением ядерных реакторов. Задачи отвода тепла от атомных реакторов на быстрых нейтронах здесь решаются с помощью жидкометаллических контуров: жидкий натрий используют как теплоноситель, а жидкий висмут иногда применяется в качестве растворителя уранового топлива. В металлургии в последние годы применяется транспортировка жидких металлов к литейным формам; все шире внедряется способ непрерывной разливки стали. Измерение расхода и скорости движения ядовитых жидкостей в химической промышленности является также проблемой.

В промышленности появляются технологические системы с твердыми, жидкостными и газообразными контурами в естественных или искусственных каналах, обладающие многими преимуществами: высокой производительностью, надежностью, экономичностью, при условии, если параметры среды — скорость, давление, температура — управляются в заданных пределах автоматически. Для управления оказались наиболее пригодны электромагнитные устройства: ЭД-насосы, ЭМ-дрессели, ЭМ-расходмеры индукционного и кондукционного типов. Появляются автономные системы — магнитогидрогенераторы, гидромагниты и другие. Одновременно возникает и быстро развивается новая наука — магнитная гидродинамика, основоположником которой является шведский ученый Альфвейн, исследовавший процессы движения плазмы в магнитных полях космоса. На Земле МГ-динамика обнаружила множество естественных, природных систем с электропроводными контурами, среды которых находятся в одном из четырех возможных агрегатных состояний. Появляются новые разделы физики: теоретическая и прикладная (техническая) магнитная гидродинамика. Возникают перспективные искусственные технологические системы с высокoeлектропроводной жидкометаллической средой в контурах и с низкoeлектропроводными контурами — водными растворами солей, кислот, щелочей и др.

Теоретические и экспериментальные исследования пространственных эффектов в каналах МГД-устройств изложены в трудах многих советских и зарубежных ученых и исследователей: А.Б.Ватажина, С.А.Регирера, М.В.Келдыша, А.Е.Шейндлина, Дж.Шерклифа, Л.Н.Корсунского, Э.В.Бенензона, А.Л.Генкина, Х.И.Янеса, Х.А.Дийн, Э.М.Ристхейма, А.И.Вольдека, Я.Лиелпетера, Ю.А.Бирзвалка, М.Штеенбена, А.М.Соурда, Б.Шелтинга, И.М.Кирко, П.Х.Робертса, О.А.Лиеллаусиса, П.П.Орлова, Х.И.Янге, Е.И.Янговского, В.П.Полищука, Э.Э.Шпильрайна и многих других.

Проблемы, поставленные в работе, подчинены одной общей цели - созданию и исследованию вариантов схем и конструкций новых эффективных типов ЭМ-устройств для систем с электропроводными контурами. Эта цель достигалась решением многих отдельных задач - комплекса вопросов, часто относящимся к различным областям науки и техники.

Каждый вариант ЭМ-устройств, рассматриваемых в работе, исследовался на новизну в институте патентной экспертизы (ВИИПЭ), разрабатывалась его математическая и физическая модель, эквивалентная схема, проводились теоретические и экспериментальные исследования. Сопоставление результатов теоретических и экспериментальных исследований позволяло судить о достоверности и адекватности выбранных математических моделей и эквивалентных схем. На основе результатов исследований создавались опытно-промышленные образцы ЭМ-устройств.

Теоретические исследования ЭМ-устройств, рассматриваемых в работе, проводились с помощью систем уравнений магнитной гидродинамики, образующей следующие группы:

I. Уравнения Максвелла для движущейся проводящей среды:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{H} &= \vec{G} \\ \operatorname{rot} \vec{E} &= -\frac{d\vec{B}}{dt} \\ \vec{G} &= \gamma(\vec{E} + [\vec{v} \vec{B}]) \\ \operatorname{div} \vec{B} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Решая эту систему относительно $\vec{B}$, получим

$$\frac{1}{\gamma \mu_0} \nabla^2 \vec{B} + \operatorname{rot} [\vec{v} \vec{B}] = \frac{d\vec{B}}{dt} \quad (2)$$

2. Уравнение Навье-Стокса:

$$\frac{\rho d\vec{v}}{dt} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \vec{F}_4, \quad (3)$$

- где
- $\vec{F}_1 = -\text{grad } p$ - перепад давления в сторону уменьшения напора;
 - $\vec{F}_2 = \rho g$ - сила тяжести на единицу объема среды с плотностью ρ ;
 - $\vec{F}_3 = \eta \nabla^2 \vec{v}$ - сила вязкого трения на единицу объема в среде с вязкостью η ;
 - $\vec{F}_4 = [\vec{E} \vec{B}]$ - объемная электромагнитная сила.

Если силы $\vec{F}_2$ и $\vec{F}_3$ малы и их можно не учитывать, то

$$\frac{\rho d\vec{v}}{dt} = -\text{grad } p + [\vec{E} \vec{B}] \quad (4)$$

3. Уравнение непрерывности:

$$\frac{d\rho}{dt} + \text{div}(\rho \vec{v}) = 0 \quad (5)$$

4. Уравнение теплового баланса:

$$\rho c \frac{dT}{dt} = \lambda \nabla^2 T + \frac{G^2}{\eta} + W_{\text{тр}} + \frac{p}{\rho} \frac{d\rho}{dt} \quad (6)$$

- где
- $\rho c \frac{dT}{dt}$ - тепло, расходуемое на увеличение температуры объема; c - теплоемкость;
 - $\lambda \nabla^2 T$ - тепло, приносимое за счет теплопроводности в единицу объема;
 - $\frac{G^2}{\eta}$ - джоулевы потери;
 - $W_{\text{тр}}$ - тепло, выделяющееся силами трения;
 - $\frac{p}{\rho} \frac{d\rho}{dt}$ - тепло, выделяющееся при изменении плотности.

Таким образом, распределение электромагнитных и гидродинамических характеристик проводящей среды, движущейся по каналу в магнитном поле, определяется из решения полной системы уравнений (I-6). Однако точное решение этой системы при учете пространственных эффектов в настоящее время практически неосуществимо. Для облегчения исследования сложных явлений использовались различные упрощенные модели. Один из приближенных методов расчета состоит в том, что вместо полной системы уравнений (I-6) решаются только некоторые уравнения электродинамики, а гидродинамические величины и частично магнитное поле предполагаются заданными, или определяются из независимых условий.

В некоторых ситуациях благодаря определенному виду векторов скорости и магнитного поля уравнения гидродинамики и электродинамики разделяются и могут быть решены последовательно. Встречаются на практике и другие ситуации, когда возможно значительное упрощение этой сложной задачи. В некоторых работах автора / I, 2 / предполагается, что движущейся электропроводной средой является металлическое твердое тело постоянного сечения по всей его длине, все части которого имеют одинаковый вектор скорости. Тогда задача решается с помощью уравнений электродинамики. Однако и в таком варианте трехмерная модель оказывается сложной и малоприемлемой. Дополнительные трудности анализа физических процессов возникают, например, когда необходимо учитывать вибрацию прокатываемого листа относительно источника магнитного поля.

ИНДУКЦИОННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ЛИНЕЙНОЙ СКОРОСТИ И ДЛИНЫ ЭЛЕКТРОПРОВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Результаты исследований в этом направлении изложены в монографии автора / I /. Исследовались, в основном, измерительные устройства, основанные на синхронизации бегущего магнитного поля с движением твердого электропроводного тела, например, полосы или листа металла. При этом, применение бегущего магнитного поля исключает влияние параметров полосы и ее температуры на точность измерения, если измерение скорости производится при синхронном движении поля и полосы. В диссертационной работе произведен обзор существующих бесконтактных методов измерения скорости прокатываемой полосы, рассмотрены предложенные автором методы и схемы индукционных измерителей скорости. Особое внимание уделено различным модификациям измерителя скорости с бегущим магнитным полем

и способам индикации синхронной скорости полосы. Произведен анализ требований к точности измерителя скорости и поставлены вытекающие отсюда задачи исследования, в частности, изыскание способов и путей обеспечения практически приемлемой точности измерений и конструктивной целесообразности измерителя.

Работа содержит теоретические исследования способов повышения чувствительности индикатора синхронной скорости проводящей немагнитной полосы. Для определения степени электромагнитного взаимодействия между немагнитной полосой и линейным статором с бегущим магнитным полем получены комплексные коэффициенты экранирования

$$b_1 = \frac{j\epsilon}{1+j\epsilon} \left(1 + \frac{th\lambda a}{\lambda a}\right), \quad (7)$$

$$b_2 = \frac{1}{\sqrt{1+b_1^2}} \exp(j \arctg b_1) \quad (8)$$

где ϵ , λ - коэффициенты, определяемые через параметры движущейся полосы и индикатора / I /.

Скорость изменения этих коэффициентов в квазисинхронном режиме в зависимости от скольжения позволяет определить чувствительность индукционного измерителя по модулю и по фазе, а также три заданной чувствительности измерителя - геометрические размеры линейного статора. При выводе уравнений принято допущение, что ширина вторичного контура - прокатываемой полосы - равна ширине линейного статора.

Проведенные экспериментальные исследования зависимости комплексного коэффициента экранирования немагнитной полосы от скольжения вблизи синхронной скорости достаточно хорошо согласуются с результатами теоретических исследований.

В работе рассмотрены также способы повышения точности бесконтактного индукционного измерителя линейной скорости полосы. Одной из основных причин возникновения статической погрешности измерителя скорости является наличие в бегущем магнитном поле линейного статора дополнительных пульсирующих магнитных полей, по отношению к которым экранирующее действие полосы сохраняется

и при синхронизме. Предложены способы уменьшения этих пульсирующих магнитных полей, а также способы подавления пульсаций и фильтрации бегущего магнитного поля. Рассмотрены условия сохранения точности индикации синхронизма в диапазоне частот, соответствующем рабочему диапазону скоростей полосы, произведена ориентировочная оценка быстродействия измерителя и даны рекомендации по дальнейшему ее увеличению. Изложены результаты разработки принципов конструкции измерителя и экспериментальной проверки моментов измерителя. Основными объектами расчетной и экспериментальной проверки послужили блок датчика — линейный статор и индикатор синхронизма.

В работе приведены результаты опытно-конструкторских работ по созданию промышленного образца бесконтактного индукционного измерителя скорости, а также разработки и изготовления поверочных устройств для высокоточного измерения скорости полосы, необходимых при определении погрешности промышленного образца измерителя. Один из вариантов принципиальных схем приведен на рис.1.

ИНДУКЦИОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ПРОКАТКИ ЦВЕТНЫХ И ЧЕРНЫХ МЕТАЛЛОВ

Результаты этих исследований изложены в монографии автора диссертации / 2 /. Здесь рассмотрены индукционные устройства с пульсирующим магнитным полем, предназначенные для измерения линейной скорости и длины электропроводных тел. Приведены теоретический анализ, результаты экспериментальных исследований и примеры расчета устройств для измерения скорости алюминиевых плос, горячекатанного черного металлического проката (при температуре около 800°C) и согласующего устройства. Проанализированы погрешность и быстродействие измерителя с пульсирующим полем.

Преимущества измерителей скорости или расхода металла, описанных в / 1 /, — в независимости результатов измерения от параметров проката. Однако их электрическая схема и конструкция магнитопровода сравнительно сложны, а нижний предел измерения скорости ~ 2 м/с. В монографии автора / 2 / даны результаты исследований более простых и не менее надежных электромагнитных устройств для измерения скорости металла с помощью постоянного или пульсирующего во времени магнитного поля. Один из вариантов схем таких ЭМ устройств показан на рис.2.

Для исследования ЭМ-устройств с пульсирующим полем использо-

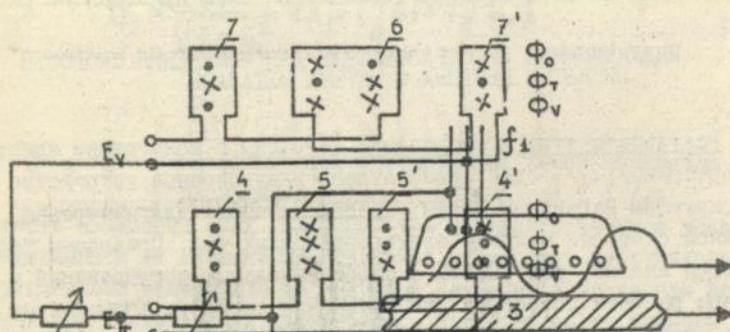
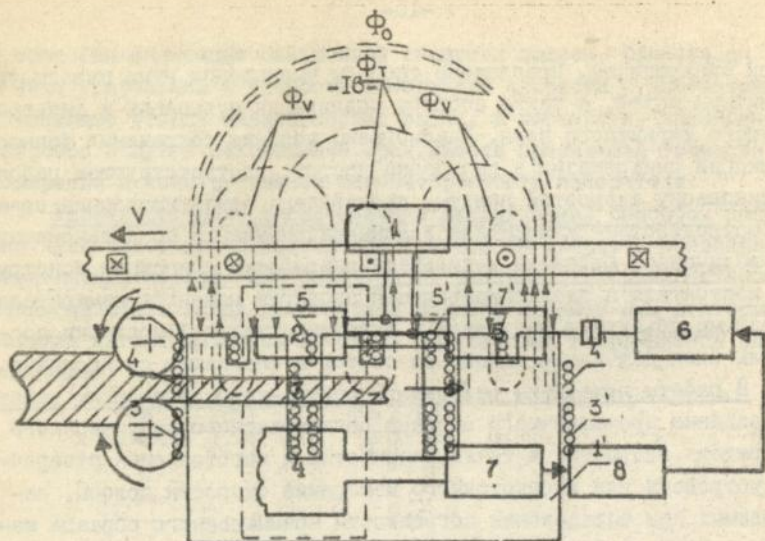
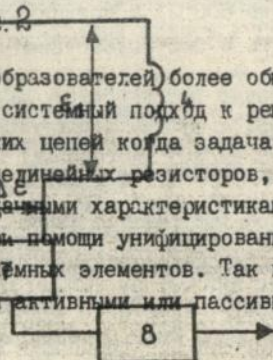


Рис. 2

телей частоты, а затем и преобразователей более общего назначения. Рассмотрен переклюкаемый системный подход к решению задач синтеза нелинейных электрических цепей когда задача синтеза элементов электрических цепей — нелинейных резисторов, катушек индуктивности и конденсаторов с заданными характеристиками $i(u)$; $\psi(u)$; $q(u)$ решается при помощи унифицированных структурных элементов и особых линейных схемных элементов. Так как схемные элементы реализуются линейными активными или пассивными четырех-

Рис. 1



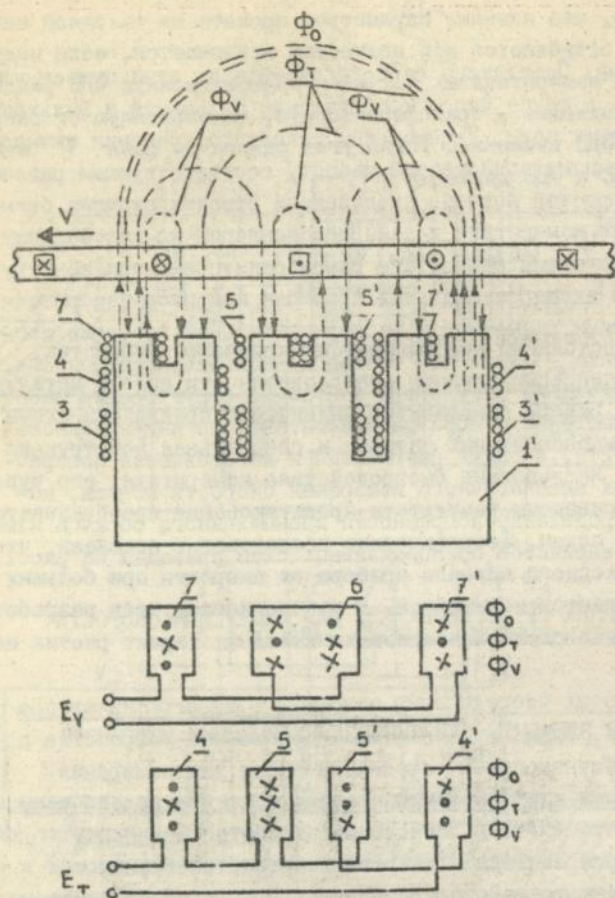


Рис. 2

телей частного, а затем и преобразователей более общего назначения. Рассмотрен перспективный системный подход к решению задач синтеза нелинейных электрических цепей когда задача синтеза элементов электрических цепей – нелинейных резисторов, катушек индуктивности и конденсаторов с заданными характеристиками $i(u)$;

$\psi(u)$; $q(u)$ решается при помощи унифицированных структурных элементов и особых линейных схемных элементов. Так как схемные элементы реализуются линейными активными или пассивными четырех-

полосниками, а структурные элементы - нелинейными двухполосниками - решение задач синтеза упрощается. Эти идеи построения структурных схемных элементов целесообразно также использовать при проектировании новых нелинейных устройств и приборов и реализовать эти устройства существующими средствами. Схемные элементы - скалары, ротаторы, рефлекторы, мутаторы - осуществляют три фундаментальных точечных преобразования геометрии на плоскости: перенос, поворот, отражение и преобразование "на себя" с переходом к другим переменным. Этих преобразований достаточно, чтобы из заданных монотонно возрастающих или убывающих функций получить большой класс характеристик, удовлетворяющих многим практическим потребностям. В принципе можно синтезировать четырехполосники, выполняющие и другие точечные преобразования геометрии, например, аффинные, проективные, круговые, что позволит расширить класс синтезируемых характеристик. Не исключена возможность синтеза нелинейных многополосников, осуществляющих преобразование многомерных пространств (функций двух или многих переменных).

Основное внимание уделено методам синтеза нелинейных электрических цепей и систем на основе аналоговых схемных инструктивных элементов, а также вспомогательных элементов - управляемым источникам тока, напряжения и преобразователям отрицательного сопротивления, входящих в состав схемных элементов.

Наиболее важные научные достижения, полученные в этом разделе работы: исследование предложенных автором преобразователей нелинейной цепи в линейную (ПНЛ) и механических схемных элементов. Синтез ПНЛ применим как при решении задач измерительной техники, так и при расчете мощных электрических систем, например, при решении вопроса повышения качества транспортируемой электрической энергии. Вариант каскадной схемы ПНЛ на схемных элементах показан на рис.3.

Механические схемные элементы могут быть весьма полезны при синтезе нелинейных неэлектрических систем и цепей. Математически они описываются уравнениями линейных четырехполосников. Например, в А-форме система описывающих уравнений имеет вид

$$\begin{aligned} X_1 &= A_{11} X_2 + A_{12} y_2 \\ y_1 &= A_{21} X_2 + A_{22} y_2 \end{aligned} \quad (10)$$

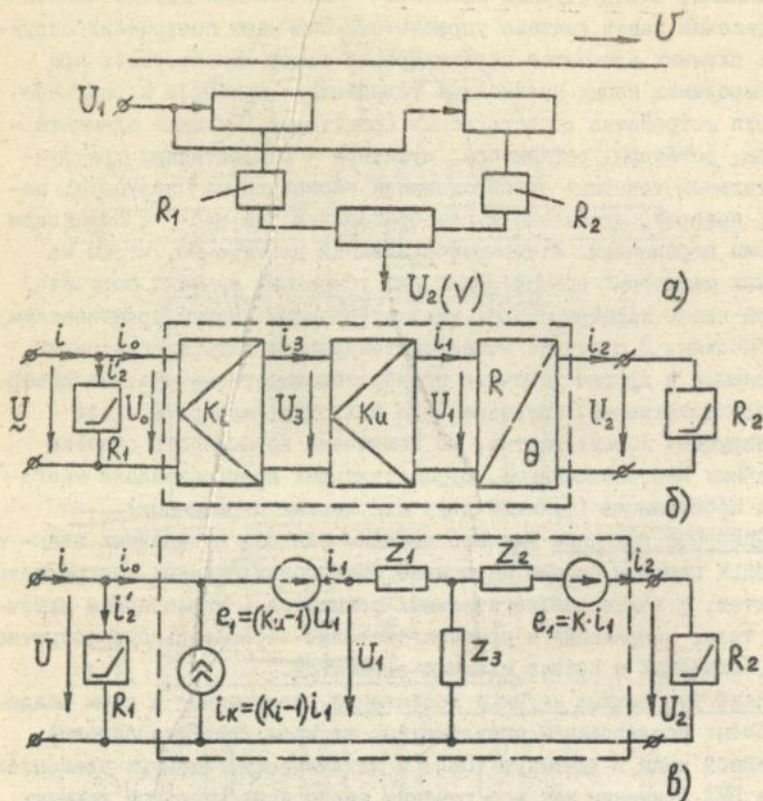


Рис. 3

где x_1, y_1 и x_2, y_2 - входные и выходные координаты точки, перемещающейся в плоскости $x_1 y_1$ и $x_2 y_2$; A_{11} ; A_{12} ; A_{21} ; A_{22} - коэффициенты.

ОСЕССИММЕТРИЧНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА В СИСТЕМАХ С ЭЛЕКТРОПРОВОДНЫМ КОНТУРОМ

Результаты теоретических и экспериментальных исследований таких устройств рассмотрены в монографии автора диссертации / 4 /.

Продольное намагничивание проводящего стержня, скользящего вдоль оси соленоидального поля. В этом разделе работы получено приближенное решение задачи продольного намагничивания проводящей квазитвердой среды, движущейся вдоль оси соленоидального магнитного поля катушки конечной длины при слабом проявлении поверхностного эффекта. Результаты решения задачи могут быть использованы при проектировании различных осесимметричных индукционных устройств, например, ЭМ-расходомеров, ЭМ-дресселей и насосов. Основные результаты теоретических исследований здесь следующие:

- Суммарная мощность (трансформации и движения), поступающая в движущуюся среду через единицу ее поверхности

$$P_1 = \frac{(W_{10} I_1)^2}{2\pi} \operatorname{Re} \left\{ \frac{\rho j_1(\rho r_0)}{j_0(\rho r_0)} \right\} \quad (11)$$

- Мощность, преобразующаяся в тепло в единице объема

$$P_{\text{жж}} = \frac{2P_1}{r_0} \quad (12)$$

- и во всем объеме на единицу длины

$$P = A_0 B(\rho r_0) \quad (13)$$

где $A_0 = \frac{2\pi(W_{10} I_0)^2}{j_1}$; $B(\rho r_0) = \operatorname{Re} \left\{ \frac{\rho j_1(\rho r_0)}{2j_0(\rho r_0)} \right\}$,

r_0 - размер (радиус) перемещающегося рабочего тела; W_{10} - число витков на единицу длины.

Приближенное аналитическое выражение для функции $B(\rho r_0) = B(q\rho)$ получено ограничением бесселевых функций членами четвертой степени:

$$\begin{aligned}
 B(y, a) &= \frac{y^2(aM - N)}{M^2 - N^2} ; & y &= \frac{r_0}{2\delta} ; \\
 M &= (1 - \frac{ay^2}{2} + \frac{(a^2-1)y^4}{12}) ; & N &= (\frac{y^2}{2} + \frac{ay^4}{6}) ; & (14) \\
 (\frac{pr_0}{2})^2 &= (a-j)(\frac{r_0}{2\delta})^2 ; & \delta &= \sqrt{\frac{2}{\mu j \omega}} ; \\
 \frac{8y^2}{\mu j r_0^2} &= \frac{v}{ab}
 \end{aligned}$$

Так как потребляемая средой мощность равна сумме трансформаторной мощности и мощности движения, то мощность движения

$$B_v(y, a) = B(y, a) - B_T(y, a) \quad (15)$$

В работе функция (15) представлена в виде графика по параметру $0,2 \leq a \leq 1,0$.

Результаты этих теоретических исследований проверены экспериментально на физической модели.

Краяевая задача для осесимметричного канала переменного сечения с осевым током в электропроводной среде. С помощью теоремы подобия исследуется задача распределения электромагнитных сил в электропроводной среде, транспортируемой по осесимметричному каналу переменного сечения. Показано, что для расчета характеристик поля электромагнитных сил, давлений или скорости потока достаточно знать функцию распределения электростатического потенциала, создаваемого кольцевыми электродами на оси симметрии канала.

Для стационарного режима в канале переменного сечения с идеальной электропроводной жидкостью и непроводящими стенками определены аналитические зависимости скорости потока и электродинамических сил от величины осевого тока между кольцевыми электродами радиусов r_1 ; r_2 , расположенных на расстоянии b по поверхности канала. Параметры среды - j, μ (рис.4). При решении такой задачи использован закон полного тока $\text{rot } \vec{H} = \vec{G}$, обобщенный закон Ома $\vec{G} = j(\vec{E} + [\vec{v} \vec{B}])$, и учитывая, что

магнитное поле имеет одну азимутальную составляющую $B_\theta = B(r, z)$ а напряженность поля $\vec{E}_z = -d\varphi/dz$; $\vec{E}_r = -d\varphi/dr$; $\varphi = \varphi(r, z)$ - потенциал любой точки канала, в цилиндрической системе координат получены два линейных дифференциальных уравнения первого порядка, определяющие компоненты скорости v_z , v_r через индукцию B и потенциал $\varphi(r, z)$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dB}{dz} + p_1 B &= \mu \gamma d\varphi(r, z)/dz \\ \frac{dB}{dr} + p_2 B &= -a d\varphi(r, z)/dr \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

где $p_1 = -\mu \gamma v_r$; $p_2 = (\frac{1}{r} + \mu \gamma v_z)$; $a = \mu \gamma$.

Электромагнитная сила $/ \vec{v} \vec{B} /$ на единицу объема среды и ее составляющие равны

$$\left. \begin{aligned} F_r &= \gamma B \frac{d\varphi}{dz} - \gamma B^2 v_r \\ F_z &= -\gamma B \frac{d\varphi}{dr} - \gamma B^2 v_z \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Для этой силы вихрь имеет одну азимутальную составляющую, параллельную вектору $\vec{B}$, а его интенсивность равна

$$\text{rot}_\theta \vec{F} = \frac{\partial F_z}{\partial r} - \frac{\partial F_r}{\partial z} = -\gamma [2B(v_z \frac{\partial B}{\partial r} - v_r \frac{\partial B}{\partial z}) + B^2 (\frac{\partial v_\theta}{\partial r} - \frac{\partial v_r}{\partial z})],$$

где $\frac{\partial B}{\partial z}$ и $\frac{\partial B}{\partial r}$ определяются из дифференциальных уравнений (15).

Если $\text{rot}_\theta F \neq 0$, то электромагнитная сила возбуждает в канале осесимметричное поле скоростей со своим вихрем $\text{rot}_\theta \vec{v}$, параллельным $\text{rot}_\theta \vec{F}$.

Электромагнитное давление

$$P_z = \int F_z dr \quad (17)$$

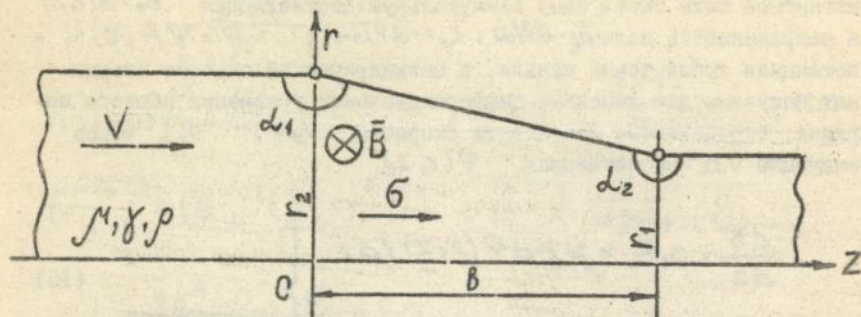


Рис.4

Функция $\varphi(r, z)$ вычисляется с помощью известной функции $\varphi(0, z)$ с помощью ряда

$$\varphi(r, z) = \varphi(z) - \varphi''(z) \frac{r^2}{4} + \varphi^{(iv)}(z) \frac{r^4}{64} + \dots \quad (18)$$

Функция $\varphi(0, z) = \varphi(z)$ имеет вид

$$\varphi(z) = \alpha_1 \varphi_{k1}(z) + \alpha_2 \varphi_{k2}(z), \quad (19)$$

где $\varphi_{k2}(z) = -\varphi_{k1}(z-b)$,

$$\varphi_{k1}(z) = Q(z^2 + r_k^2)^{-1/2} / 4\pi\epsilon_0, \quad (20)$$

$r_k = r_1$ или r_2 .

Из теории подобия $\gamma Q = \epsilon I$. Коэффициенты α_1 и α_2 определяются по величине угла излома канала в месте расположения электродов (рис.4).

Предложенный приближенный метод расчета силы, давления и скорости потока в осесимметричном канале с двумя кольцевыми электродами различного диаметра можно распространить на канал с n электродами и n токами.

Осесимметричное индукционное устройство для измерения скорости электропроводной среды. В результате анализа индукционного измерителя линейной скорости электропроводной среды с осесимметричным магнитным полем получены оценки чувствительности, погреш-

ности и линейности характеристик устройства, а также предложены способы оптимизации параметров и улучшения характеристик прибора.

Наиболее важные результаты работы следующие:

1. Определены ЭДС трансформации, ЭДС движения и ЭДС ускорения, индуцирующиеся в среде, движущейся в синусоидальном магнитном поле кольцевой катушки конечной длины

$$E_{\omega_2} = A_1 \omega^2 ; \quad E_{v_2} = A_1 \omega v / 3 ; \quad E_{g_2} = A_1 g / 6 \quad (21)$$

где $A_1 = \frac{K_{S1} K_{S2} (\mu_0 S_1)^2 \omega_1 I_1}{2(p+c) R_0 Z_0}$ -- постоянная прибора.

2. Определен фазовый угол между ЭДС измерительных катушек, пропорциональной скорости среды

$$\varphi_v = \arctg[v_p / (1 + v_t)] \quad (22)$$

3. Определен коэффициент эффективности преобразования

$$v_p = v / \omega b \quad (23)$$

4. Построена эквивалентная схема замещения устройства, удобная при расчетах; получены формулы, определяющие ее параметры. Предложены варианты схем возбуждения или самовозбуждения прибора при работе на повышенных частотах.

5. Предложены методы компенсации температурной погрешности прибора.

6. Получена формула комплексного коэффициента ослабления выходного сигнала осесимметричного индукционного измерителя скорости расплавленного металла внутренним коаксиальным экраном. Приведены примеры расчета.

7. Приведена классификация параметров, подлежащих оптимизации. Рассмотрены методы получения оптимальных геометрических параметров полюса источника магнитного поля индукционных и кондукционных ЭМ-устройств.

8. Показано, что для кондукционных ЭМ-устройств оптимальный параметр полюса τ , соответствующий максимальной чувствительности прибора, равен $\sim 1,8 + 2$, а для индукционных приборов $\tau = 0,3 + 0,8$. Приведены рекомендации по выбору источников магнит-

ного поля. Рассмотрена работа электромагнитного измерителя ускорения электропроводной среды.

Электромагнитный затвор соленоидального типа. Функции ЭМ-вентелей-заслонок, способных регулировать расход металлического расплава в системах снабжения жидким металлом, могут выполнять насосы с плоским или осесимметричным источником бегущего магнитного поля, работающего в режиме электромагнитного тормоза, а также более простые и дешевые соленоидальные катушки индуктивности. Электродинамические устройства, выполняющие эти функции, называют электродинамическими дросселями (затворами).

Развиваемое дросселем давление, тормозящее жидкость, пропорционально величине $\sqrt{B^2 \delta}$ (активный дроссель), либо величине $\sqrt{B^2 \delta}$ (пассивный дроссель). Задача об управлении скоростью потока решается с помощью дифференциального уравнения Навье-Стокса / 3 /. В работе исследуется возможность применения в качестве ЭД-дросселя катушки индуктивности. Задача о распределении электромагнитных сил, создаваемых катушкой с током в жидком металле, решается с помощью векторного потенциала в предположении, что поверхностный эффект проявляется слабо, а жидкость обладает очень большой вязкостью, и гидравлическим переходным процессом можно пренебречь. Поскольку в таком режиме электромагнитная сила уравнивается только силами вязкого трения и градиентом давления, уравнение Навье-Стокса становится магнитогидростатическим.

Результаты решения задачи, полученные в виде бесконечных рядов, следующие.

1. Формулы для вычисления аксиальной и радиальной составляющих давления

$$\left. \begin{aligned} P_z(r, z) &= \frac{K_1 M z K_1^2}{8} \left[H_z(0) H_z'(0) - \frac{r^2}{8} [H_z'(0) H_z''(0) \dots] \right] \\ P_r(r, z) &= - \frac{K_1 M r^2}{8} \left[H_z^2(0) - \frac{3r^2}{8} H_z(0) H_z'(0) + \dots \right] \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

где

$$\begin{aligned} H_z(0) &= a (r_0^2 + z^2)^{-3/2} \\ H_z'(0) &= -3a z (r_0^2 + z^2)^{-5/2} \\ &\dots \end{aligned}$$

Средняя величина электродинамической силы

$$F_{10} = \int_S P_z(r, z) dS \quad (26)$$

В работе исследован также трехобмоточный трехфазный электродинамический дроссель.

Электромагнитное управление траекторией свободно падающей струи жидкого металла. Исследован вариант модели устройства для отклонения траектории движения свободно падающей струи жидкого металла электромагнитным полем кольцевой катушки индуктивности. Получена приближенная формула расчета отклоняющей катушки по заданному углу отклонения струи и ее параметрам. Приведена экспериментальная проверка этой формулы.

В работе рассмотрены несколько вариантов возможной траектории падающей струи и выбран наиболее вероятный вариант. Предполагается, что $Sr = c \cdot nst$, а в области действия на струю ЭМ-сил отдельно $S = const$; $v = const$. Центробежные и гигроскопические силы не учитывались. Движение струи математически описывалось дифференциальным уравнением движения маятника постоянной длины.

Результаты исследований:

1. Формула ЭД-момента кольцевой катушки, действующей на струю:

$$M = K_s \frac{P}{\omega} S_{ок} \sin 2\varphi, \quad (27)$$

где $K_s = (r_0/r_0)^2$ - коэффициент рассеяния магнитного поля;

$P = \frac{(\omega_0 l)^2}{2\pi} KRe \left\{ \frac{(a-j)Y_1(Pr_0)}{Y_0(Pr_0)} \right\}$ - активная мощность, поступающая в струю цилиндрической формы через ее боковую поверхность;

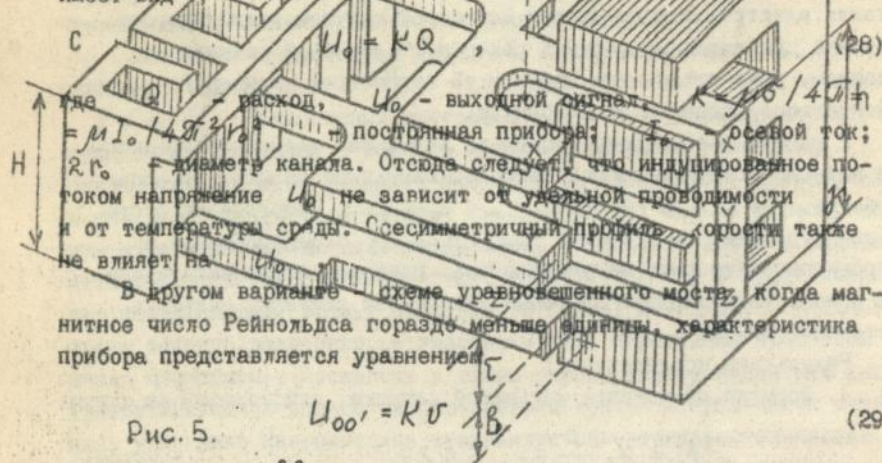
$P^2 = \omega \mu f(a-j)$; $a = v/\omega b$; b - осевой градиент магнитного поля.

В работе приведен пример расчета катушки индуктивности и график ее характеристики $M = C_1 \sin 2\varphi$, где φ - угол отклонения струи от вертикали.

Электромагнитное устройство с осевым током. Исследовано ЭМ-устройство, в котором магнитное поле создается током, протекающим по электропроводной среде вдоль оси симметрии прибора. Для возбуждения осевого тока в среде на поверхности канала установлены три массивных контактных кольцевых электрода, с помощью которых линейный участок трубы подключается ко вторичным обмоткам согла-

сующих тороидальных трансформаторов, расположенных также на трубе. Применение таких трансформаторов уменьшает потери энергии, улучшает условия эксплуатации устройства. При слабом токе возбуждения ЭМ-устройство работает в режиме расходомера. Когда мощность трансформаторов достаточна для создания в жидкости режима, близкого к пини-эффекту, то устройство способно выполнять функции ЭД-расходомера или ЭД-насоса.

В работе исследуются характеристики устройства в различных режимах с помощью уравнений Навье-Стокса и закона Ома, а также с помощью схемы замещения, включающей внешние электрические цепи. Показано, что в режиме расходомера характеристика устройства имеет вид



где Q - расход, U_0 - выходной сигнал, $K = \frac{4\pi}{4\pi} \frac{I_0}{2r_0}$ - постоянная прибора; I_0 - осевой ток; $2r_0$ - диаметр канала. Отсюда следует, что индуцированное потоком напряжение U_0 не зависит от удельной проводимости и от температуры среды. Ассиметричный профиль скорости также не влияет на U_0 .

В другом варианте - схеме уравновешенного моста, когда магнитное число Рейнольдса гораздо меньше единицы, характеристика прибора представляется уравнением

$$U_{00}' = KV \quad (29)$$

Рис. 5.

где $K = 5\pi B^2$ - постоянная.

В режиме электромагнитного затвора при весьма малых скоростях потока давление, развиваемое электромагнитными системами сопоставления отдельных ее частей и взаимные комплексные сопротивления между частями МЭТО были определены с помощью уравнений Максвелла приближенно, при этом роль теоретических оценок удовлетворительна только для средней части модуля.

В работе рассмотрены электромагнитные связи между обмотками трансформаторов, подключенных к двухфазному источнику напряжения, асимметричные электромагнитные связи между обмотками трансформатора и проводниками, а также электромагнитные связи между проводниками обмотки и проводниками, находящимися в магнитном поле по окружности цилиндрического канала малого диаметра, - получены формулы для расчета электромагнитной связи между индуктором и каналом с электропроводной жидкостью. Эти формулы необходимы при проектировании как МЭТО, так и линейного индуктора.

Экспериментальные исследования МЭТО, изготовленных литьем из алюминия с внутренней схемой соединения "звезда-звезда" и "звезда-двойная звезда", подтвердили результаты теоретических исследова-

Средняя величина электродинамической силы

$$F_{10} = \int_{\Sigma} \mathbf{f}_2(r, z) dS \quad (26)$$

В работе исследован также трехобмоточный трехфазный электро-
динамический дроссель. $B(z, t) = B_m e^{\sin(\omega t - \frac{\sqrt{2}}{B} z)}$ (31)

Электромагнитное управление траекторией свободно падающей
струи жидкого металла. Исследован вариант модели устройства для
увлечения за собой жидкости. Скорость бегущего поля
металла электромагнитным полем кольцевой катушки индуктивности.
Получена приближенная формула расчета отклоняющей катушки (32)
заданному углу отклонения струи и ее параметром. Приведена экспе-
риментальная электромагнитная модификация канала

В работе рассмотрены несколько вариантов возможной траекто-
рии падающей струи и выбран наиболее вероятный вариант. Предпо-
лагается, что $Sr = c \cdot nst$, а в области действия на струю
Оценка качества и проектирование модуля бесконтактной трех-
фазной обмотки (МБТО). Работа / 4 / посвящена вопросам анализа
гипотетические силы не учитывались. Действие струи математиче-
бесконтактной пространственной электрической цепи, объединяющей
ски описывалось дифференциальным уравнением движения маятника
вторичную обмотку трехфазного трансформатора, обмотку индуктора
постоянной длины.
Результаты исследований: выполненной в виде модуля (МБТО). Получены аналитические харак-
теристики отдельных частей и всего модуля. Показано, что когда
индуктор и согласующий трансформатор выполнены в непосредствен-
ной близости или когда их магнитопроводы конструктивно связаны,
например, в технологических системах с жидкими или твердыми
электропроводными контурами - коэффициент рассеяния магнитного поля;
преимущества и недостатки традиционных и новых схем, поступающая
в модуль МБТО индукционная энергия и ее соотношение с энергией

без потерь и для показан на рис. 6 МБТО может работать в индукцион-
тичешки до любой известной схеме соединений цепей трехфазного
тока. Технические характеристики прибора, в частности, гра-
дусная характеристика и деления ступах. В работе пред-
ложено и описано устройство универсальной схемы замещения МБТО,
с помощью которого можно описать характеристики МБТО. Исследовано ЭМ-
фициентное поле и создаваемое магнитное поле создается током, протекающим
по электропроводной среде вдоль оси симметрии прибора. Для воз-
буждения осевого тока в среде на поверхности канала установлены
три массивных контактных кольцевых электрода, с помощью которых
и "коэффициент рассеяния" бегущего магнитного поля

$$\lambda = B_s / \angle B$$

(35)

где P_2 , $P_{им}$ - мощность, поглощаемая индуктором и мощность, подводимая к МВТО; $B\delta$ - индукция бегущего поля; ΣB - суммарная индукция поля индуктора.

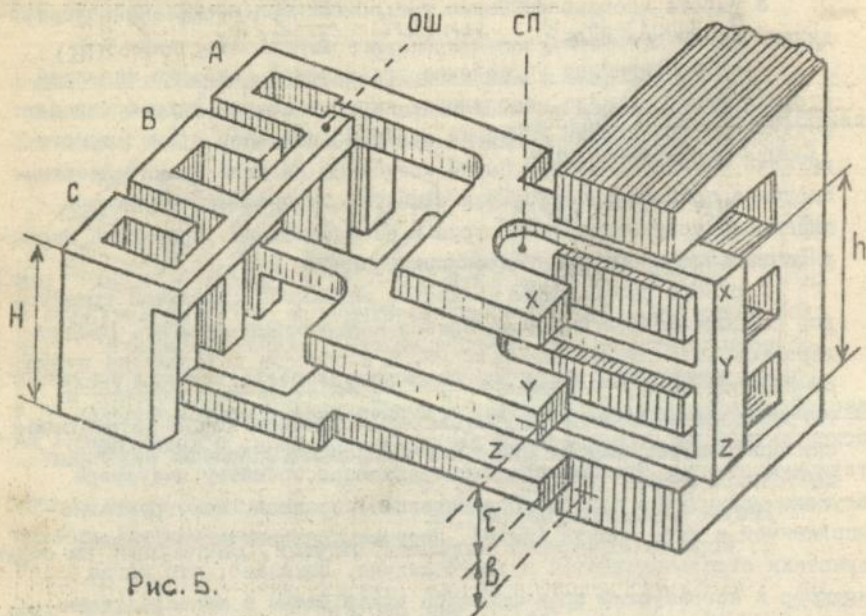


Рис. 5.

Параметры схемы замещения МВТО - комплексные собственные сопротивления отдельных ее частей и взаимные комплексные сопротивления между частями МВТО были определены с помощью уравнений Максвелла приближенно, поэтому точность теоретических оценок удовлетворительна только для средней части модуля.

В работе исследована возможность амплитудно-фазового симметрирования фазных токов МВТО с помощью искусственной амплитудно-фазовой асимметрии токов первичной обмотки согласующего трансформатора. Предложена и исследована конструкция магнитопровода индуктора бегущего поля, позволяющая концентрировать магнитное поле по образующей цилиндрического канала малого диаметра, - получены формулы для расчета электромагнитной связи между индуктором и каналом с электропроводной жидкостью. Эти формулы необходимы при проектировании как МВТО, так и линейного индуктора.

Экспериментальные исследования МВТО, изготовленных литьем из алюминия с внутренней схемой соединения "звезда-звезда" и "звезда-двойная звезда", подтвердили результаты теоретических исследова-

ний. Особенно эффективной оказалась работа МБТО в повторнократковременном режиме, когда развиваемая мощность в индукторе с двумя МБТО в 15+20 раз превышала "номинальную".

Оценка качества бегущего магнитного поля линейного индуктора с помощью разработанного автором специального трехфазного диодного измерителя мгновенного значения индукции поля каждой фазы и фазового сдвига между ними осциллографическим методом. Этот же прибор служил для контроля симметрии токов МБТО.

Подчеркнем еще раз преимущества устройств с МБТО.

1. Коэффициент заполнения обмоток линейного индуктора и вторичных обмоток трехфазного согласующего трансформатора для МБТО близок к единице.

2. Лобовые части модульной обмотки индуктора имеют минимальные геометрические размеры, поэтому коэффициент рассеяния поля значительно меньше.

3. Отсутствие изоляции способствует хорошей теплоотдаче через всю поверхность модуля и индуктора. Температура модуля ограничена температурой плавления.

4. Устройство с МБТО более компактно, имеет меньшие габариты и вес.

Кондукционное электромагнитное устройство в стационарном и импульсном режимах. С помощью интегральных характеристик проведено исследование вариантов схем, конструкций и режимов работы кондукционного магнитогидродинамического устройства для технологических систем с жидким электропроводным (обладающим нелинейной вольтамперной характеристикой) контуром. Приведены некоторые результаты эксперимента на действующей модели устройства. Поставлен ряд имеющих теоретическое и практическое значение проблем, связанных с применением кондукционного устройства в промышленных системах. Дана ориентировочная методика расчета МГД-кондукционного устройства для случая квазитвердого электропроводного контура, когда жидкость обладает большой вязкостью, а внутренние силы трения о стенки канала незначительны. Исследован также импульсный режим работы устройства.

Кондукционное электромагнитное устройство, предназначенное для транспортировки, дросселирования или измерения параметров электропроводной среды, как правило, не должно изменять ее химические, механические и другие свойства. Устройства другого назначения, например, гидромагниты, МГД-генераторы, реактивные дви-

гатели, используют среду активно: они могут изменять ее физико-химические параметры и, если необходимо, выводят среду за пределы жидкого контура.

При выводе характеристик приняты следующие допущения.

- Поток среды непрерывен, несжимаем и безвихревой. Векторы скорости потока $\vec{v}$, плотность тока $\vec{j}$ и индукции поля $\vec{B}$ направлены вдоль осей координат Z , X , Y . Профиль скорости потока прямоугольный. Магнитное число Рейнольдса $Re_m < 1$. Внутренние силы трения и сила трения среды о стенку канала пренебрежительно малы по сравнению с ЭД-силой $|\vec{j} \times \vec{B}|$. Движение потока среды рассматривается как движение квазитвердого тела без трения.

- Длина электродов в среде и длина полюсов электромагнита значительно больше их ширины и расстояния между ними, а магнитное поле на краях полюсов спадает плавно. В такой конструкции краевые эффекты практически отсутствуют.

- Толщина слоя потока меньше глубины проникновения электромагнитной волны в среду: $h \ll \sqrt{2/\omega\mu\sigma}$, что позволяет пренебрегать поверхностным эффектом. ЭДС Холла $U_x = R_B \vec{j} / \mu$ мала, и эффект Холла не учитывается.

- Нелинейная зависимость удельной проводимости среды от температуры учитывается в стационарном режиме.

- Электрическая цепь кондукционного ЭД-устройства содержит два сопротивления контактного перехода между электропроводной жидкой средой и электродами. Причиной появления этого сопротивления является возникновение двойного слоя с напряжением порядка 0,1 В (электрокинетический потенциал). Сопротивление контактного перехода зависит от многих факторов, в частности, от толщины двойного слоя, степени смачивания жидкости, температуры, концентрации раствора, плотности тока в среде и др. Сопротивление контактного перехода не учитывалось.

Некоторые результаты теоретических и экспериментальных исследований следующие.

I. Механические характеристики ЭМ устройства в статическом режиме для параллельной схемы возбуждения

$$\left. \begin{aligned} P &= -C_1 v + C_2 \\ v &= -P/C_1 + C_2/C_1 \end{aligned} \right\} , \quad (36)$$

где $C_1 = \alpha \gamma B^2$; $C_2 = \alpha \gamma B U_k / \epsilon_k$; a - длина рабочего участка канала (рис.6).

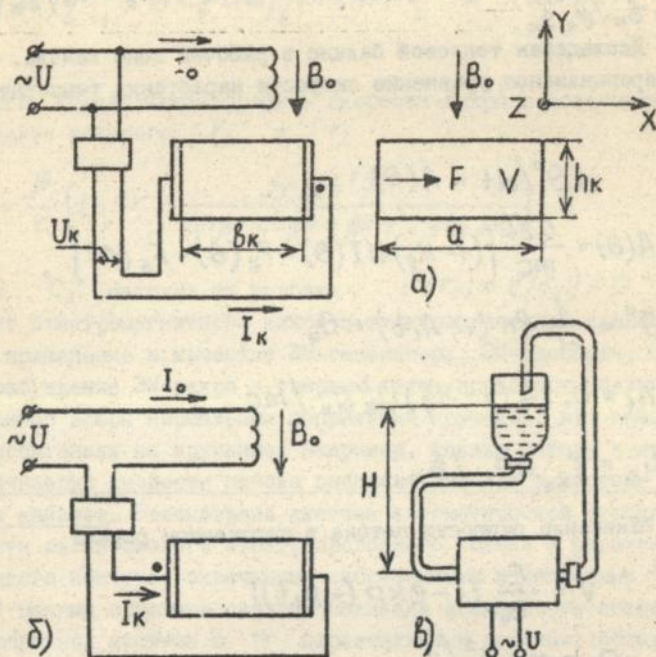


Рис. 6

Если ввести относительный коэффициент нелинейности проводимости среды от температуры $\beta = \gamma_0 / \gamma_0$, то механические характеристики для последовательной схемы возбуждения в статическом режиме принимают вид

$$\left. \begin{aligned} p &= -\beta^2 C_1 v + \beta C_2 \\ v &= -p / \beta^2 C_1 + C_2 / \beta C_1 \end{aligned} \right\} \quad (37)$$

При изменении температуры водных растворов электролитов на $\pm 50^\circ\text{C}$ коэффициент β изменяется круглым счетом в два-три раза.

2. Результирующее магнитное поле гидромагнита

$$B = (1 + \kappa_R \text{Re}_m) B_0 \quad (38)$$

где B_0 - индукция возбуждающего магнитного поля;

$Re_m = \mu \gamma a v$ - магнитное число Рейнольдса;
 $K_R = 1/(1 + R_B/R_K)$; $R_B = b_B/\gamma_B s_B$;
 $R_K = b_K/\gamma_K s_K$.

3. Исследован тепловой баланс в рабочей зоне канала. Получено дифференциальное уравнение скорости нарастания температуры в канале

$$d\theta^0/dt = A(\theta) , \quad (39)$$

где $A(\theta) = \frac{0,24}{mc} \left\{ (1 - K_g) U I(\theta) - F_z(\theta) - F_b(\theta) \right\} ,$

$$\theta^0 = \frac{1}{\alpha} \ln(\alpha A_1 t) + \theta_0 , \quad (40)$$

$$A_1 = 0,24(1 - K_g) U_K^2 G_K / mc ,$$

$$G_K = \gamma_{K_0} a h_K / b_K .$$

4. Изменение скорости потока в переходном режиме

$$v = \frac{E}{B_0} (1 - \exp(-p_1 t)) , \quad (41)$$

где $p_1 = \gamma g B^2 / \rho .$

Электромагнитный вихрь в электропроводной среде. В результате исследований электромеханического вихревого движения электропроводной среды, возбуждающего взаимодействием осевого магнитного поля и радиального поля токов проводимости определены профиль азимутальной составляющей скорости потока, границы и энергетические параметры вихря; получены приближенные соотношения для проектирования электромагнитных вихревых устройств (рис.6.в).

Уравнение движения вихря получено с помощью совместного решения уравнения Навье-Стокса и обобщенного закона Ома. Азимутальный профиль скорости свободного вихря

$$v(r) = (b - p^*) j_1(qr) \quad (42)$$

где
$$J_1(Qr) = r \left(1 - \frac{Qr^2}{3^2} + \frac{Q^2 r^4}{5^2} - \frac{Q^4 r^6}{7^2} + \dots \right),$$

$$Q = \mu B^2 / \zeta, \quad b = \mu \zeta B / \zeta \ln r^2 / r_1, \quad \rho^* = 2\pi \rho / \zeta.$$

Формула, определяющая профиль скорости вихря в коаксиальном канале, радиус которого r_1 и r_2

$$v = \frac{\beta}{r} \left[\operatorname{th} \beta r - \frac{2c_1 \operatorname{ch}^2 \beta r}{\operatorname{sh} \beta r \operatorname{ch} \beta r + \beta r + 2\beta c_2 / R} \right], \quad (43)$$

где C_1 и C_2 находят из условия $v(r_1) = v(r_2) = 0$.

Эффект электромагнитного вихря в электропроводной среде может найти применение в качестве ЭМ-генератора, ЭМ-дросселя, ЭМ-насоса. Возбуждение ЭМ-вихря в твердых телах позволяет получить нетрадиционные эпюры нормальных напряжений кручения, что необходимо при испытаниях на кручение, например, тонких пленок и др.

Стабилизация скорости потока расплава металла в системе параллельных каналов. Рассмотрена система автоматической стабилизации скорости сильновязкого электропроводного потока в параллельных ветвях жидкого контура, охваченных собственными и взаимными (перекрестными) цепями обратных связей. Показана возможность создания стабилизированной системы с n параллельными ветвями, обладающей весьма высокой степенью устойчивости к переходному процессу и повышенными показателями качества регулирования (рис.7).

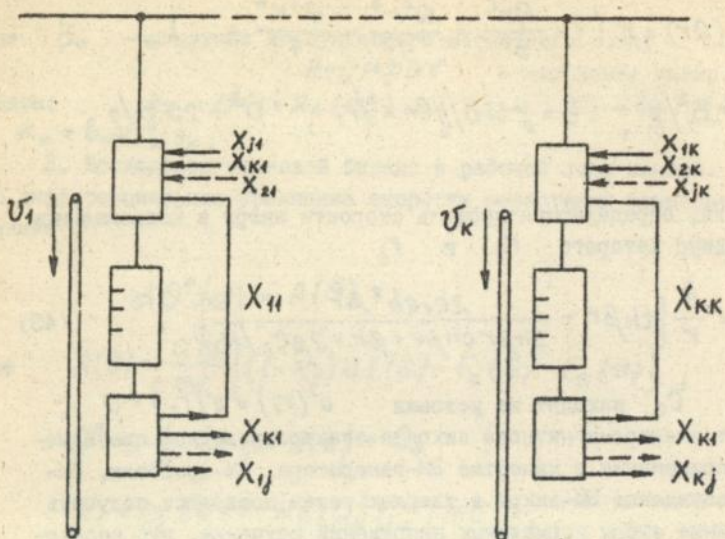
В системе с n параллельными каналами состояние L -го канала, охваченного собственной и взаимными обратными связями всех $n - 1$ каналов описывается линейным дифференциальным уравнением первого порядка

$$\frac{dv_i}{dt} = a_i + (\alpha_{i1} v_1 + \alpha_{i2} v_2 + \dots + \alpha_{in} v_n), \quad (44)$$

решение которого

$$v_i = v(\infty) + \sum_k^n v_{ik} e^{p_k t}. \quad (45)$$

После изменения масштаба времени, коэффициенты a_i исклю-



$n=1,2,\dots,k,\dots,j,\dots$

Рис.7

чаются и уравнение движения системы в матричной форме имеет вид
 ($\dot{U} = X$; $\dot{U} = \dot{X}$)

$$\dot{\underline{X}} = \underline{A} \underline{X} \quad , \quad (46)$$

где $\underline{A}$ - квадратная матрица коэффициентов α_{ij} . Решение системы уравнения (46) известно.

В работе рассматриваются два метода регулирования (стабилизации) системы с помощью автоматического управления скоростью потока среды: частотный метод (изменением синхронной скорости бегущего поля индуктора) и амплитудный (изменением скольжения при изменении напряжения возбуждения на зажимах индуктора). При частотном методе регулирования (индукция поля В поддерживается постоянной) система

(46) линейна, а при амплитудном (частота тока возбуждения постоянна) система (46) квадратична.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, на основании выполненных автором исследований и разработок, получены научно обоснованные технические решения комплекса теоретических и прикладных проблем создания и внедрения новых типов и конструкций электромагнитных устройств, необходимых для повышения эффективности и надежности работы технологических систем и автономных электротехнических установок с электропроводным контуром, а также поставлены некоторые перспективные проблемы разработки кондукционных электромагнитных устройств с низкотемпературной и слабопроводящей жидкой или газообразной средой.

Наиболее важные научные и практические результаты выполненных исследований состоят в следующем.

1. Разработаны новые методы контроля и измерения скорости и расхода электропроводной среды, защищенные авторскими свидетельствами и патентами.

2. Установлена аналитическая связь между параметрами электропроводной среды и параметрами ее движения. Получены критериальные коэффициенты, определяющие связь между параметрами среды, электромагнитного поля и геометрией канала. Исследованы некоторые проблемы в области кондукционных электромагнитных устройств.

3. Разработан и исследован новый эффективный метод согласования электропроводного контура с внешними источниками электрической энергии стандартного напряжения с помощью модулей БТО.

4. Проведены теоретические и экспериментальные исследования методов возбуждения электромагнитных вихрей в электропроводной среде. Получены аналитические зависимости профиля азимутальной составляющей скорости вихря, содержащие параметры электромагнитного поля и среды.

5. Проведены теоретические исследования электромагнитных явлений в квазитвердой электропроводной среде при ее движении в соленоидальном магнитном поле.

6. Получены интегральные характеристики $\sqrt{P}$ потока в канале кондукционного электромагнитного устройства. Исследовано влияние внутреннего экрана электромагнитного устройства на эффективность и характеристики его работы.

7. Предложена математическая модель ЭМ-устройства для электромагнитного управления траекторией свободно падающей струи жидкого металла.

8. Предложены, исследованы и защищены авторскими свидетельствами новые конструкции электромагнитных устройств для технологических систем с электропроводными контурами, разработаны инженерные методы их расчета.

9. В результате разработки вопросов теории, создания и внедрения некоторых типов ЭМ-устройств были продолжены и развиты перспективные исследования в области электродинамики и магнитной гидродинамики.

10. Результаты диссертационной работы, в частности, исследования, изложены в книге "Схемные элементы для синтеза нелинейных устройств", могут быть использованы в учебном процессе, при чтении курсов лекций по ТОЭ, Электрооборудованию систем с электропроводными контурами, Системам электротехнологии.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

I. Монографии.

1. Пивоваров Л.В. Индукционные измерители линейной скорости и длины. - М.: Энергия, 1972, - 82с.
2. Пивоваров Л.В. Индукционные преобразователи для измерения скорости проката. - М.: Энергия, 1981, - 66 с.
3. Пивоваров Л.В. Схемные элементы для синтеза нелинейных устройств. - М.: Энергоатомиздат, 1986, - 98 с.
4. Пивоваров Л.В. Осесимметричные электромагнитные устройства в системах с электропроводным контуром. - М.: 1990, - 256 с.

II. Изобретения.

5. А.с. I68244 (СССР). Устройство для измерения скорости проводящей прокатываемой полосы из магнитного и немагнитного материалов. Л.В.Пивоваров, опубл. в Б.И. 1965, № 4.
6. А.с. I62800 (СССР). Способ измерения ускорения, скорости и метража прокатываемой полосы. Л.В.Пивоваров, Опубл. в Б.И. 1964., № II.
7. А.с. В1079 (СССР). Устройство для бесконтактного измерения скорости движения проводящей полосы. Л.В.Пивоваров, Л.В.Карношин, 1964.
8. Удостоверение 745065 (СССР). Устройство для бесконтактного измерения скорости движения проводящей полосы. Л.В.Пивоваров, 1961 г.

9. Патент I097.666 (Великобритания). *Devize for Non-contact Measurement of Speed of Moving Strip of Electrically Conductive Material* Nev. 8; 1966 int Cl.: - G01p 3/50. Л.В.Пивоваров, Л.В.Карньюшин.
10. Патент I673444 (ФРГ). *Einrichtung zur kontaktlosen Messung der Beugungsgeschwindigkeit von elektrisch leitendem Bandmaterial*. Л.В.Пивоваров, Л.В.Карньюшин. *Oftenerlegungschrift* 1.673.444. Deutsche Kl. 420, 13/10. 16. September, 1974.
11. Патент 3462675 (США). *Device For Noncontact Measurement of Speed of Moving Strip of electrically conductive material*. Л.В.Пивоваров, Л.В.Карньюшин. *US. GL. 324-70. 7 Claims. Patented Aug. 19, 1969.*
12. А.с. 1311 (СССР). Устройство для бесконтактного измерения скорости движения проводящей полосы. Л.В.Пивоваров, Оpubл. в Б.И. 1968, № 19.
13. А.с. 213431 (СССР). Устройство для бесконтактного измерения линейной скорости движения тонких ферромагнитных тел. Л.В.Пивоваров, Оpubл. в Б.И. 1968, № 10.
14. А.с. 150169 (СССР). Устройство для бесконтактного измерения скорости движущейся тонкопроводящей полосы. Л.В.Пивоваров, Оpubл. в Б.И. 1962, № 18.
15. А.с. 301615 (СССР). Устройство для измерения линейной скорости. Л.В.Пивоваров, Л.В.Карньюшин, Л.Г.Костин, А.В.Бохуа, П.Д.Спарсиашвили, Г.И.Подлубный, Оpubл. в Б.И. 1971, № 14.
16. А.с. 190104 (СССР). Устройство для бесконтактного измерения линейной скорости проводящей полосы. Л.В.Пивоваров, Л.В.Карньюшин, Оpubл. в Б.И. 1966, № 1.
17. А.с. 164359 (СССР). Способ выделения бегущей и пульсирующих составляющих индукции магнитного поля двигателя. Л.В.Пивоваров, Оpubл. в Б.И. 1964, № 15.
18. А.с. 694295 (СССР). Устройство для обрезки кромок листов. Л.В.Пивоваров, Ю.Т.Калашников, Оpubл. в Б.И. 1979, № 40.
19. А.с. 535507 (СССР). Измеритель скорости немагнитных электропроводных сред. Л.В.Пивоваров, Оpubл. в Б.И. 1976, № 42.
20. А.с. 848190 (СССР). Устройство для обрезки кромок листов. Л.В.Пивоваров, Ю.Т.Калашников, О.М.Колочий, В.В.Трегубенко, Оpubл. в Б.И. 1981, № 27.
21. А.с. 1024856 (СССР). Стенд испытательный. Л.В.Пивоваров, Оpubл. в Б.И. 1983, № 23.
22. А.с. 1164604 (СССР). Измеритель скорости немагнитных тел с компенсацией биений. Л.В.Казakov, Л.В.Пивоваров, В.В.Самоброд.

Ш. Статьи.

23. Пивоваров Л.В. Бесконтактное измерение скорости проката методом синхронизации бегущего магнитного поля с движением проводящей полосы. // Электромашиностроение и электрооборудование. Харьков: Высшая школа, Выпуск 3, 1966, с.18-22.
24. Пивоваров Л.В., Карнющин Л.В. Квазисинхронный режим асинхронного двигателя с бегущим магнитным полем. // Электромашиностроение и электрооборудование. Харьков: Высшая школа, Выпуск 2, 1966, с.11-16.
25. Пивоваров Л.В. Метод измерения бегущей и пульсирующей составляющих магнитного поля в устройствах с разомкнутым магнитопроводом. // Электромашиностроение и электрооборудование. Харьков: Высшая школа, Выпуск 2, 1966, с.47-53.
26. Пивоваров Л.В. Бесконтактное измерение скорости прокатки методом синхронизации бегущего магнитного поля с движением проводящей полосы. // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Харьков. 1965.
27. Пивоваров Л.В., Карнющин Л.В. Измерение скольжения асинхронных машин с дуговым статором. // Электротехника, № 2, М.: Энергия. 1969, с.17-19.
28. Пивоваров Л.В., Карнющин Л.В., Липская З.Г. Датчик с пульсирующим магнитным полем для измерения скорости электропроводной полосы. // Приборы и системы управления, № 6, М.: Машиностроение. 1971, с.25-26.
29. Пивоваров Л.В., Карнющин Л.В., Липская З.Г. Измерение линейной скорости проводящей полосы индукционными приборами с пульсирующим магнитным полем. // Контрольно-измерительная техника, № 12, Львов: Вища школа, 1972, с.100-105.
30. Пивоваров Л.В. Синтез нелинейного аналогового преобразователя двух независимых переменных. // Контрольно-измерительная техника, № 18, Львов: Вища школа, 1975, с.69-76.
31. Пивоваров Л.В., Коваленко Д.К., Липская З.Г. Механизм для интерполяции функций. // Контрольно-измерительная техника, № 18, Львов: Вища школа, 1975, с.94-97.
32. Пивоваров Л.В., Коваленко Д.К., Измеритель толщины немагнитного листового проката. // Контрольно-измерительная техника, № 21, Львов: Вища школа, 1977, с.121-126.
33. Пивоваров Л.В. Графоаналитический синтез нелинейного преобразователя. // Электрические и магнитные измерения. Киев: Наукова думка, 1977, с.37-43.

34. Пивоваров Л.В. Графический анализ разветвленных линейных цепей методом Зейделя. // Проблемы технической электродинамики. Киев: Наукова думка, 1978, № 66, с.9-13.
35. Пивоваров Л.В., Борисов В.П., Липская З.Г. Измерение скорости движения ферромагнитных тел. // Проблемы технической электродинамики. Киев: Наукова думка, 1978, № 68, с.97-101.
36. Пивоваров Л.В. Синтез преобразователя нелинейной цепи в квазилинейную. // Контрольно-измерительная техника, № 24, Львов: Вища школа, 1978, с. 20-29.
37. Пивоваров Л.В., Трегубенко В.В. Измеритель длины горячих листов и плит. Контрольно-измерительная техника, № 28, Львов: Вища школа, 1980, с.88-96.
38. Пивоваров Л.В., Трегубенко В.В. Механические схемные элементы. // Теория механизмов и машин, № 33, Харьков: Вища школа, 1982, с. 109-112.
39. Пивоваров Л.В. Оценка качества и проектирование модуля бесконтактной трехфазной обмотки. // Электричество, М.: Энергоатомиздат, № 10, 1990, с.19-26.
40. Пивоваров Л.В., Борисов В.П., Турчин А.П., Таранушенко С.И., Тихонов А.П. Краевая задача для осесимметричного канала переменного сечения с осевым током. // Техническая электродинамика, № 2, Киев: Наукова думка, 1991, с.3-8.
41. Борисов В.П., Пивоваров Л.В., Таранушенко С.И., Турчин А.П., Тихонов А.П. Электромагнитное устройство с осевым током. // Техническая электродинамика, Киев: Наукова думка, № 3, 1991, с. 3-9.
42. Пивоваров Л.В. Осесимметричный индукционный измеритель скорости. // Техническая электродинамика, Киев: Наукова думка, № 6, 1986, с.89-95.
43. Пивоваров Л.В. и др. Продольное намагничивание проводящего стержня, скользящего вдоль оси соленоидального поля. // Техническая электродинамика. Киев: Наукова думка, № 4, 1986, с. 7-12.
44. Пивоваров и др. Электромагнитное управление траекторией свободно-падающей струи жидкого металла. // Техническая электродинамика, Киев: Наукова думка, № 4, 1988, с. 74-77.
45. Пивоваров Л.В. и др. Влияние внутреннего экрана на выходной сигнал осесимметричного индукционного измерителя скорости электропроводной среды. // Техническая электродинамика. Киев: Наукова думка, № 1, 1988, с. 24-27.

46. Пивоваров Л.В. и др. Электродинамический затвор в системах транспортировки жидкого металла. // Электричество. М.: Энергоатомиздат, № 4, 1988, с.74-77.
 47. Пивоваров Л.В., Борисов Б.П. Согласующее устройство индукционного измерителя скорости жидкого металла. // Техническая электродинамика. Киев: Наукова думка, № 5, 1988, с. 91-95.
 48. Пивоваров Л.В. и др. Оптимизация параметров электромагнитного измерителя скорости и ускорения электропроводной среды. // Техническая электродинамика (депонир.). Киев, 1989.
 49. Пивоваров Л.В., Борисов Б.П. Электромагнитное устройство с осевым током. // Техническая электродинамика, Киев: Наукова думка, № 3, 1991, с.3-9.
 50. Пивоваров Л.В., Борисов Б.П. Краевая задача для осесимметричного канала переменного сечения с осевым током в электропроводной среде. // Техническая электродинамика, Киев: Наукова думка, № 2, 1991, с.3-8.
 51. Пивоваров Л.В. Кондукционное электромагнитное устройство. // Электричество, М.: Энергоатомиздат, № 9, 1990, с.1-6.
- IV. Доклады на научно-технических конференциях.
52. Пивоваров Л.В. Методы уменьшения пульсирующих магнитных полей в электрических машинах с разомкнутым магнитопроводом. Тезисы доклада III научно-технической конференции Краматорского индустриального института, 1962.
 53. Пивоваров Л.В., Карнюшин Л.В. Управляемый двухфазный электронный преобразователь частоты мощностью 250 Вт. Тезисы доклада IV научно-технической конференции УЗПИ, Харьков, 1963.
 54. Пивоваров Л.В., Карнюшин Л.В. Чувствительность и методическая погрешность бесконтактного измерителя скорости движения прокатываемых полос. Тезисы докладов V научно-технической конференции УЗПИ, Харьков, 1964.
 55. Пивоваров Л.В., Карнюшин Л.В. Метод измерения бегущей и пульсирующей составляющих магнитного поля в устройствах с разомкнутым магнитопроводом. Тезисы доклада VI научно-технической конференции УЗПИ, Харьков, 1965.
 56. Пивоваров Л.В., Карнюшин Л.В. Бесконтактное измерение скорости движения полосы металла в процессе прокатки. Тезисы доклада III научно-технической конференции УЗПИ, Харьков, 1962.
 57. Пивоваров Л.В., Карнюшин Л.В. Принципы построения схем индукционных измерителей расхода электропроводных жидкостей и газов. Тезисы доклада VIII научно-технической конференции УЗПИ, Вып. 3, 1967.

58. Пивоваров Л.В. Модуляция частоты трехфазного машинного генератора. Тезисы доклада IX научно-технической конференции УЗПИ, Харьков, 1968.
59. Пивоваров Л.В. Экспериментальное определение постоянных времени в системах автоматического управления электроприводом. Тезисы доклада УІ научно-технической конференции Краматорского индустриального института, 1968.
60. Пивоваров Л.В. Индукционная симметричная трехфазная печь промышленной частоты. Тезисы доклада У Краматорской научно-технической конференции, Краматорский индустриальный институт, 1967.
61. Пивоваров Л.В. Використання ефекта Баркгаузена для генерування випадкових цес. в Матеріалы X науково-технічної конференції УЗПІ, вип. II, Харків, 1969.
62. Пивоваров Л.В., Карнюшин Л.В. Расчет однофазных индукторов для датчиков скоростей немагнитных электропроводных тел. Тезисы доклада на XIV научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, УЗПИ, 1973.
63. Пивоваров Л.В. Измеритель линейной скорости ферромагнитных тел. Тезисы доклада X Краматорской конференции прогрессивных технологических процессов, КИИ, 15-10. апреля 1974.
64. Пивоваров Л.В. Бесконтактный автоматический выключатель. Тезисы доклада X Краматорской научно-технической конференции прогрессивных технологических процессов, КИИ, 1974.
65. Пивоваров Л.В. Нелинейный аналоговый преобразователь. Тезисы доклада X Краматорской научно-технической конференции прогрессивных технологических процессов, КИИ, 1974.
66. Пивоваров Л.В. Расчет квазилинейных магнитных цепей методом пропорциональных величин. Тезисы доклада X Краматорской научно-технической конференции прогрессивных технологических процессов, КИИ, 1973.
67. Пивоваров Л.В. Фазовый метод бесконтактного измерения скорости ферромагнитных тел. Тезисы доклада X Краматорской научно-технической конференции прогрессивных технологических процессов, КИИ, 1974.
68. Пивоваров Л.В. Синтез нелинейного функционального преобразователя. Тезисы доклада XV научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, УЗПИ, 1974.
69. Пивоваров Л.В. Методы расчета нелинейного функционального преобразователя. Тезисы доклада XVII научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, УЗПИ, 1983.

Личный вклад автора в работах, написанных в соавторстве, состоит в следующем. В работах 9,10,15,18,20,22,31,32,35,44 автору принадлежит постановка проблемы, идея решения, построение моделей, обобщение выводов; работы 48,49,50,51,52,57 принадлежат всем авторам поровну; в работах 58,61,62,66 автору принадлежит научная постановка задачи, анализ результатов и обобщение выводов.

Ливоваров Л.В.

Подписано к печати 04.03.1992 г. Формат 60x84/16
 Лумага офсетная Усл.-печ. лист, 2,0 Уч.-изд. лист 2,0.
 Тираж 120. Заказ 818. Бесплатно

Полиграф. уч-к Института электродинамики АН Украины,
 252057, Киев-57, проспект Победы, 56.