

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени АБУ РАЙХАНА БЕРУНИ

На правах рукописи

УДК 621.314.36

Ширинова ЛЕЙЛА

Многопредельные трансформаторы тока для систем управления устройствами
электрооборудования дорожного транспорта

05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники
и систем управления

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Амиров Султон Файзуллаевич

Ташкент – 2012

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность работы. Контроль и управление режимами работы трансформаторов и выпрямительных агрегатов тяговых подстанций и других устройств систем электроснабжения электрифицированной железной дороги, линии электропередач, тяговых генераторов, электродвигателей тепловозов и электровозов, а также автоматизированный учет вырабатываемой и потребляемой электрической энергии на железнодорожном транспорте основаны на информациях о больших токах, получаемых с помощью измерительных преобразователей (ИП). Расширение функциональных возможностей преобразователей токов путем обеспечения многопредельности и снижения погрешности преобразования в переходных режимах, а также достижение стабильности работы этих измерительных преобразователей позволяют повысить эффективность применения систем автоматического управления режимами работы устройств электроснабжения электрифицированных железных дорог. В связи с этим разработка ИП больших переменных токов (ИПБПТ) с расширенными функциональными возможностями и высокой точностью в переходных режимах систем электроснабжения является актуальной задачей.

Сравнительный анализ основных характеристик существующих ИПБПТ показывает, что для преобразования больших переменных токов (БПТ) в системах управления и контроля наиболее приемлемы и перспективны многопредельные трансформаторы тока (ТТ).

Многопредельность в существующих ТТ осуществляется, в основном, изменением количества витков первичного и вторичного обмоток. Однако при этом существенно увеличивается погрешность преобразования. В диссертационной работе предлагается осуществить многопредельность ТТ путем создания противомангнитодвижущей силы (МДС).

Степень изученности проблемы. Разработкам и исследованиям ТТ посвящены многочисленные работы, однако все они направлены, в основном на снижение погрешности ТТ. Между тем особенность проблемы состоит в том, что для каждого диапазона изменения преобразуемого тока разработаны отдельные типоразмеры и модификации ТТ. Это ограничивает функциональные возможности каждого типоразмера. Вопросы разработки многопредельных (универсальных) ТТ, удовлетворяющих требованиям современных систем управления и контроля, все еще остаются недостаточно изученными. Решение вопросов, связанных с разработкой многопредельных ТТ с расширенными функциональными возможностями, улучшенными динамическими свойствами для систем управления, и обусловило выбор темы настоящего исследования.

Связь диссертационной работы с тематическими планами НИР. Диссертационная работа выполнена в соответствии с планом научно-исследовательских работ факультета «Электромеханика» Ташкентского института инженеров дорожного транспорта по теме «Совершенствование электромагнитных измерительных средств для дорожного транспорта».

Цель исследования. Целью диссертационной работы являются разработка и исследование многопредельных трансформаторов тока с расширенными функциональными возможностями и улучшенными динамическими свойствами для систем управления устройствами электроснабжения дорожного транспорта.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

- изучить вопросы преобразования больших переменных токов на современном этапе и сформулировать основные требования систем управления и контроля к этим ИП;
- провести сравнительный анализ основных характеристик существующих ИПБПТ;
- выбрать и обосновать типы ИПБПТ;
- разработать новые конструкции многопредельных ТТ с улучшенными технико-экономическими показателями;
- разработать математические модели многопредельных ТТ;
- исследовать основные характеристики многопредельных ТТ;
- разработать методику инженерного расчета многопредельных ТТ.

Объект и предмет исследования – многопредельные трансформаторы тока, разработка их математических моделей и исследование основных характеристик.

Методы исследований: теории электрических и магнитных цепей и электромагнитного поля, погрешностей, энергоинформационный и морфологический методы поискового конструирования датчиков и аппарат параметрических структурных схем (ПСС) с применением компьютерной техники, а также экспериментальные методы исследований.

Гипотеза исследования. Достижение многопредельности ТТ созданием и регулированием противоМДС, способствующее расширению функциональных возможностей ТТ и повышению его точности в переходных режимах.

Основные положения, выносимые на защиту:

- многопредельные ТТ с расширенными функциональными возможностями и улучшенными динамическими свойствами;
- математические модели многопредельных ТТ;
- способ снижения погрешности преобразования многопредельных ТТ при их работе в переходных режимах;
- результаты исследования основных характеристик многопредельных ТТ.

Научная новизна. Впервые проведены теоретические и экспериментальные исследования новых многопредельных ТТ, разработаны их математические модели с учетом особенностей основной кривой намагничивания сердечника. Предложен способ снижения погрешности преобразования многопредельных ТТ при их работе в переходных режимах. Научная новизна технических решений подтверждается пятью основными патентами РУз.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Созданные многопредельные ТТ имеют расширенные функциональные возможности и относительно высокую точность преобразования при работе в

переходных режимах. Разработанные математические модели, учитывающие особенности первичной цепи и основной кривого намагничивания, позволяют на стадии проектирования многопредельных ТТ исследовать их в статическом и динамическом режимах. Составленные морфологические матрицы ТТ по выбранной структурной схеме и физико-технических эффектов позволяют резко увеличить количество синтезируемых вариантов конструктивных исполнений ТТ и обеспечивают сокращение времени компоновки их скелетной конструкции на этапе поискового проектирования. Применение разработанного трансформатора тока в системах управления устройствами электроснабжения железных дорог позволяет повысить точность управления, в результате чего более эффективно используются энергетические ресурсы систем электроснабжения электрифицированных железных дорог.

Реализация результатов. Разработанный многопредельный ТТ внедрен в производственный процесс на тяговой подстанции «Транспортный» дистанции электроснабжения «Хаваст» для преобразования БПТ. Устройство и описание новой конструкции многопредельного ТТ, методика исследования статических и динамических характеристик, инженерного расчета электромагнитных и конструктивных параметров, расчета погрешностей многопредельных ТТ переданы для использования в учебных процессах Ташкентского института инженеров железнодорожного транспорта и Ташкентского государственного технического университета.

Апробация работы. Основные результаты и положения диссертации доложены и обсуждены на республиканских научно-технических конференциях «Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте» с участием зарубежных ученых (Ташкент, 2005, 2006 и 2009гг.), Международной научно-технической конференции «Современное состояние и перспективы развития энергетики» (Ташкент, 2006г.), Международной научно-практической конференции «От легендарного Турксиба к стратегической трансевразийской магистрали», посвященной 75-летию со дня начала эксплуатации Турксиба, (Алматы, 2006г.), Международной научно-практической конференции «Инновация-2006» (Ташкент, 2006г.), Всероссийской научно-практической конференции «Безопасность движения поездов» (Москва, 2007г.), Всероссийской научной конференции «Инновационные технологии в управлении, образовании, промышленности «АСТИНТЕХ-2007» (Астрахань, 2007г.), Республиканской научно-практической конференции «По проблемам наземных транспортных систем» (Ташкент, 2007г.).

Опубликованность результатов. Основное содержание диссертации опубликовано в 19 научных трудах, в том числе 1 статья – в международном журнале «Электротехника» (Москва), 1 статья – в журнале «Вестник Казахской академии транспорта и коммуникации им. М. Тынышпаева», 2 статьи – в журнале «Вестник ТашИИТ», 10 работ – в материалах международных и республиканских конференций. Получено 5 основных патентов РУз на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, заключения, списка использованной литературы, содержащего 140 отечественных и зарубежных источника, и приложения. Работа изложена на 119 страницах компьютерного текста, содержит 54 рисунков, 5 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснована актуальность работы, освещено состояние вопроса, сформулированы цель, задачи исследования и основные положения, выносимые на защиту, раскрыты научная новизна, научная и практическая значимость.

В **первой главе – «Вопросы преобразования больших переменных токов на современном этапе»** – изучаются назначение, условия и режимы работы ИПБПТ в системах управления устройствами электроснабжения железнодорожного транспорта, сформулированы физические основы измерения БПТ. Установлено, что ИПБПТ, применяемые в системах управления и контроля, должны иметь широкий и регулируемый диапазон преобразования, высокую точность и стабильность характеристик в экстремальных условиях эксплуатации, а также обладать расширенными функциональными возможностями.

Проведен сравнительный анализ и составлена классификация существующих ИПБПТ. Выявлено, что резистивные ИП требуют разрыва цепи – их практически невозможно применять в цепях высокого напряжения, обладают большой динамической погрешностью (до 5%). Электромеханическим ИП присущи низкая надежность из-за наличия подвижной части и большая погрешность (до 10%). Магнитомодуляционные ИП имеют значительные массогабаритные показатели, обладают большой инерционностью и на их показания существенное влияние оказывают внешние магнитные поля и ферромагнитные массы. Магнитные компараторы тока, являющиеся наиболее точными и чувствительными по сравнению с другими ИП, требуют введения в них схему авторегулирования тока, защиты сердечников от влияния посторонних полей и обладают большой инерционностью. Необходимость разрыва цепи при их установке и получения строго равномерного магнитного поля, а также большой порог чувствительности существенным образом ограничивают область применения магнитрезонансных ИП. Магнитогальванические ИП обладают конструктивной и технологической сложностью и нестабильностью характеристик преобразования. Магнитооптические ИП имеют относительно низкую чувствительность, сложность конструктивного исполнения и неоднозначную зависимость преобразуемого тока от угла поляризации света. Всем вышеприведенным ИПБПТ присуща сложность регулирования диапазона преобразования, т.е. обеспечения многопредельности.

Установлено, что наиболее широкое распространение не только в системах управления и контроля на железнодорожном транспорте, но и в других

отраслях народного хозяйства нашли ТТ. Они имеют высокие метрологические характеристики, высокую надежность, перегрузочную способность, простоту обслуживания и регулирования диапазона преобразования, большую выходную мощность, а также не нуждаются в вспомогательных источниках энергии.

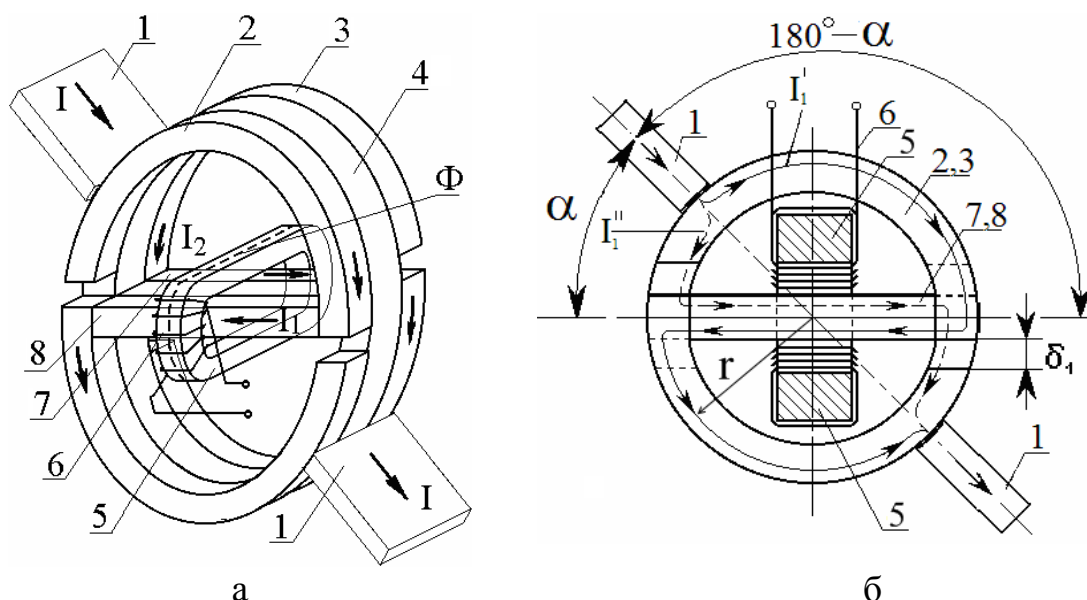
Выявлено, что выполнение ТТ с конкретным диапазоном преобразования токов существенно сужает их функциональные возможности. Они имеют низкую точность при их работе в переходных режимах объектов управления и контроля – устройств электроснабжения электрифицированных железных дорог. Показана перспективность разработки многопредельных ТТ с расширенными функциональными возможностями и улучшенными динамическими свойствами. Составлена классификация ТТ по способам осуществления в них многопредельности. Показано, что самым практичным в осуществлении многопредельности является способ за счет регулирования МДС магнитной системы ТТ. При этом с нашим участием впервые предложен вариант реализации этого способа за счет изменения количества витков многовиткового сердечника ТТ.

Анализ существующих конструктивных исполнений многопредельных ТТ показал, что дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку новых конструкций многопредельных ТТ с расширенными функциональными возможностями и улучшенными динамическими свойствами, а также на теоретическое и экспериментальное изучение их основных характеристик.

Исходя из результатов анализа литературных источников и в соответствии с поставленной целью сформулированы основные задачи исследования.

Вторая глава – «Разработка многопредельных трансформаторов тока» – посвящена усовершенствованию многопредельных ТТ с использованием методов технического творчества, в частности, энергоинформационного и морфологического методов поискового конструирования. Использование этих методов позволило выявить физическую сущность усовершенствований, закономерность основных направлений проектирования многопредельных ТТ, что и облегчило разработку новых ТТ с требуемыми характеристиками. Показана целесообразность совместного применения энергоинформационного и морфологического методов. Установлено, что морфологический синтез многопредельных ТТ по их выбранной структурной схеме позволяет разработать новые ТТ с требуемыми характеристиками без привлечения из автоматизированного банка данных дополнительных физико-технических эффектов (ФТЭ). Показано, что составление морфологических матриц не на ТТ в целом, а для каждого ФТЭ ПСС ТТ позволяет резко увеличить количество их синтезируемых вариантов и в конечном итоге выбрать конструкцию ТТ с требуемыми характеристиками.

Разработано несколько конструкций многопредельных ТТ. На основе анализа принципов их действия установлено, что наиболее полно требованиям систем управления и контроля отвечает ТТ, многопредельность которого осуществлена созданием и регулированием противоМДС в первичной цепи. Одна из конструкций таких многопредельных ТТ показана на рис. 1.



а
б
1 – шина с преобразуемым током; 2, 3 – кольцевые элементы; 4 – изоляционная прокладка; 5 – сердечник; 6 – измерительная обмотка; 7, 8 – диаметральные перемычки.

Рис. 1. Многопредельный ТТ: а – аксонометрическое изображение; б – вид спереди

В данной конструкции многопредельного ТТ путем поворота металлического круга устанавливают диапазон преобразования токов. При преобразовании небольших токов шина с преобразуемым током подключается к зажимам диаметральных перемычек. В этом случае весь преобразуемый ток проходит по диаметральным перемычкам в одном направлении из-за наличия зазоров δ_1 в обоих кругах. Следовательно, порог чувствительности предлагаемого многопредельного ТТ при преобразовании небольших токов снижается до значения порога чувствительности обычного шинного ТТ с ферромагнитным замкнутым сердечником. Анализ работы данного многопредельного ТТ показал, что верхний предел преобразования практически неограничен, а в качестве сердечника могут быть использованы серийно выпускаемые ленточные тороидальные или овальные магнитопроводы. Кроме того, из-за того, что рабочий магнитный поток в сердечнике создается разностным током диаметральных перемычек, влияние аperiodической составляющей первичного тока в переходных режимах на результат преобразования незначительно.

В диссертации предложен способ снижения погрешности ТТ при работе в переходных режимах, согласно которому магнитная цепь ТТ разделяется на две ветви. Первая ветвь состоит из магнитопровода с к.з. витком – электромагнитным экраном, а вторая – из магнитопровода с зазором и вторичной обмоткой.

Третья глава – «Математические модели многопредельных трансформаторов тока» – посвящена разработке математических моделей многопредельных ТТ с линейной и нелинейной кривой намагничивания

магнитопровода, а также электрического поля между высоковольтной и низковольтной обмотками ТТ.

При этом допускалось, что первичная обмотка подключена к идеальному источнику тока с бесконечным внутренним сопротивлением, индуктивность рассеяния первичной обмотки равна нулю, коэффициент преобразования – отношению чисел витков первичной (w_1) и вторичной (w_2) обмоток; индуктивности рассеяния вторичной обмотки (L_{2S}) и нагрузки (L_H) линейны; цепь намагничивания ТТ в установившемся режиме замещается линейной индуктивностью (L_0); активные потери в сердечнике равны нулю.

Получена математическая модель первичной цепи многопредельных ТТ в виде аналитической зависимости разностной МДС от преобразуемого тока:

$$U_{\mu 1} = I_{II} w_1 = (I_1' - I_1'') w_1 = \frac{[R_2(\alpha) - R_1(\alpha)] I_1}{[R_1(\alpha) + R_2(\alpha) + R_{II}]} = \Delta \cdot I_1, \quad (1)$$

где $R_1(\alpha) = \rho \frac{l_1(\alpha)}{S} = \rho \frac{\pi r}{180^\circ S} \cdot \alpha$, $R_2(\alpha) = \rho \frac{l_2(\alpha)}{S} = \rho \frac{\pi r}{180^\circ S} \cdot (180^\circ - \alpha)$ –

электрические сопротивления кольцевых элементов с длиной $l_1(\alpha)$, $l_2(\alpha)$ и поперечным сечением S ; ρ – удельное электрическое сопротивление

материала кольцевых элементов; $R_{II} = \rho \frac{2r}{S}$ – электрическое сопротивление диаметральных перемычек кольцевых элементов.

Анализ выражения (1) показывает, что разностный ток зависит от угла поворота кольцевых элементов относительно шины с преобразуемым током, при $0 \leq \alpha \leq 90^\circ$ разностная МДС изменяется от $I_1 w_1$ до нуля.

Сравнительный анализ математических моделей входного сигнала многопредельных ТТ показал, что обобщенной моделью является

$$i_1 = I_{m1} e^{-\frac{t}{T_1}} \sin(\omega t + \psi_i),$$

широко применимой моделью –

$$i_1 = I_{mi} \sin(\omega t + \psi_i) + I_{a1H} e^{-\frac{t}{T_1}},$$

где T_1 – постоянная времени первичной цепи ТТ; I_{a1H} – начальное значение апериодической составляющей первичного тока.

Разработана математическая модель многопредельного ТТ с линейной кривой намагничивания, учитывающая параметры первичной, вторичной и нагрузочной цепей:

$$i_2 = \frac{\frac{d}{dt} C_\mu K_{I_{21} U_{\mu 1}} K_{I_\mu U_{22}} [R_2(\alpha) - R_1(\alpha)] \cdot i_1}{2[(R_{20} + R_H) + \frac{d}{dt} w_2^2 C_\mu + \frac{d}{dt} (L_{2S} + L_H)][R_1(\alpha) + R_2(\alpha) + R_{II}]}, \quad (2)$$

где $C_\mu = \mu\mu_0 \frac{S_\mu}{l_\mu}$ – магнитная емкость магнитной цепи; μ и μ_0 – соответственно относительная магнитная проницаемость материала сердечника и магнитная постоянная; S_μ и l_μ – соответственно площадь поперечного сечения и средняя длина магнитной цепи (сердечника); $K_{I_{\Sigma 1} U_{\mu 1}} = w_1$ – межцепный ФТЭ между электрическим током и магнитным напряжением (эффект ампервитков); $K_{I_\mu U_{\Sigma 2}} = w_2$ – межцепный ФТЭ между магнитным током намагничивания и электрическим напряжением; R_{20} и R_H – соответственно активные электрические сопротивления вторичной обмотки и нагрузки.

Разработана математическая модель многопредельного ТТ с нелинейной кривой намагничивания на основе применения кусочно-линейной аппроксимации в виде спрямленной характеристики намагничивания (СХН). Показано, что известный принцип определения второй опорной точки наклонного участка аппроксимирующей характеристики намагничивания обеспечивает необходимую точность лишь для расчета ТТ, работающих с большими напряженностями магнитного поля, а особенностью работы многопредельных ТТ в переходных режимах объектов управления являются относительно небольшие напряженности поля при насыщении сердечника. Установлено, что применение известного принципа выбора расчетных параметров СХН для таких режимов работы многопредельных ТТ приводит к большим погрешностям: в процессе расчета расхождение действительной и аппроксимированной характеристик не ограничивается, в результате чего расчетное мгновенное значение вторичного тока отличается от действительного, превосходящее допустимое.

Поэтому в диссертации в целях устранения указанных недостатков метода СХН и расширения области его применения этот метод усовершенствован выбором второй опорной точки наклонного луча СХН. Для этого использован принцип выбора характерных точек кусочно-линейной аппроксимации характеристик нелинейных элементов, в соответствии с которой, задавшись допустимой погрешностью расчета, параметры СХН необходимо выбрать так, чтобы в пределах рабочего диапазона расхождение между аппроксимирующей и действительной характеристиками по оси напряженности не давало погрешности по току, превышающей заданную.

В соответствии с вышеуказанным сущность предлагаемой методики выбора расчетных параметров СХН заключается в следующем: 1) задается допустимая абсолютная погрешность расчета по току ΔI_∂ ; 2) по ΔI_∂ определяется допустимая погрешность аппроксимации характеристики намагничивания по напряженности магнитного поля $\Delta H_\partial = \Delta I_\partial \frac{w_2}{l_{cp}}$; 3) по характеристике намагничивания (рис. 2) находится индукция насыщения B_s , соответствующая ΔH_∂ . Значением B_s ограничивается вертикальный

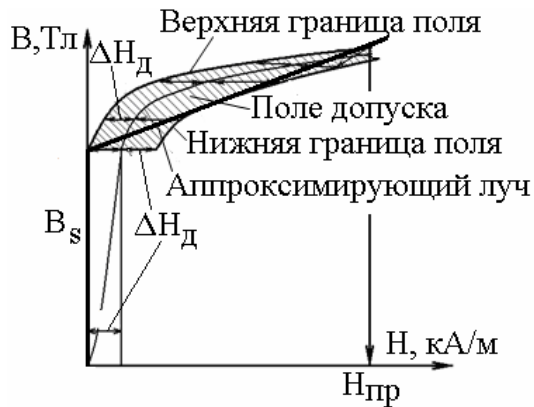


Рис. 2. Построение СХН по заданному значению погрешности расчета

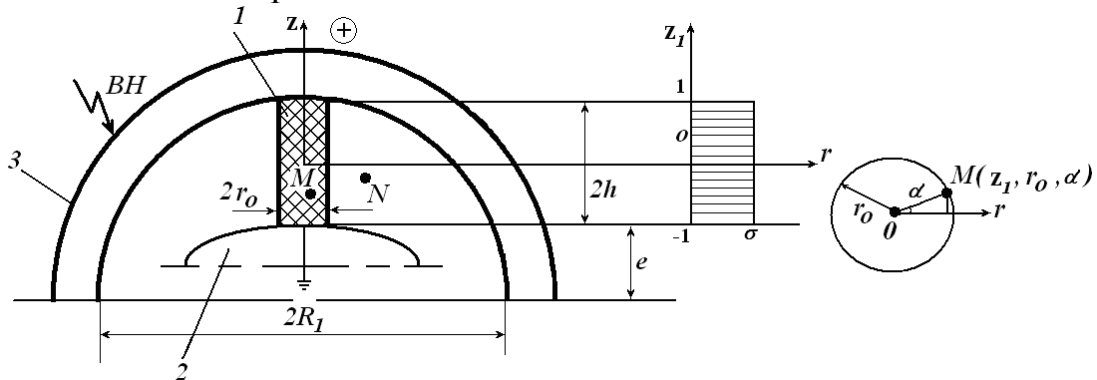
поле допуска кривой.

Таким образом, расчет нелинейных процессов в разработанном многопредельном ТТ при аппроксимации цепи намагничивания СХН сводится к решению нескольких линейных уравнений магнитных цепей.

В диссертации исследовано электрическое поле между высоковольтной шиной и вторичной обмоткой многопредельного ТТ (рис. 3). Потенциал электрического поля на поверхности изолятора описывается уравнением Пуассона, общее решение которого имеет следующий вид:

$$\tilde{\varphi} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0\epsilon} \int \frac{\sigma d\tilde{s}}{\tilde{L}}, \quad (3)$$

где $\tilde{s}$ – размерная длина дуги окружности; $\tilde{L}$ – размерная расстояния между точками $M(z_1, r_0, \alpha)$ на цилиндрической поверхности изолятора и произвольной точкой $N(z, r, \beta)$ в пространстве между изолятором 1 и высоковольтным электродом 3.



1 – цилиндрический изолятор; 2– электрод с низковольтной обмоткой; 3 – высоковольтный электрод (шина); r_0 – радиус цилиндрического изолятора; $2h$ – высота цилиндрического изолятора.

Рис.3. Расчетная схема электрического поля многопредельного ТТ

Частное решение уравнения Пуассона получено с учетом граничных условий задачи: при $z = D$, $\varphi = 0$, а при $z = -B$, $\varphi = U_0$:

$$\varphi = C \int_0^{2\pi} \frac{1}{A} \lg \left[\frac{A(z+1) + \sqrt{1+r^2 - 2r \cos \alpha + A^2(z+1)^2}}{A(z-1) + \sqrt{1+r^2 - 2r \cos \alpha + A^2(z-1)^2}} + \frac{z+D}{2D} \left(\frac{A(D+1) + \sqrt{1+r^2 - 2r \cos \alpha + A^2(D+1)^2}}{A(D-1) + \sqrt{1+r^2 - 2r \cos \alpha + A^2(D-1)^2}} \right) - \frac{z-B}{2B} \left(\frac{A(B+1) + \sqrt{1+r^2 - 2r \cos \alpha + A^2(B+1)^2}}{A(B-1) + \sqrt{1+r^2 - 2r \cos \alpha + A^2(B-1)^2}} \right) \right] d\alpha, \quad (4)$$

где $C = \frac{A^2 r_0 \sigma}{2\pi \varepsilon_0 U_0}$; $A = \frac{h}{r_0}$; $B = 1 + b + h - b \sqrt{1 - \frac{r^2}{a^2}}$; $D = \sqrt{R^2 - r^2} - (e - h)$;

U_0 – приложенное к электроду высокое напряжение, σ – плотность поверхностного заряда. В уравнение (4) все величины переведены в безразмерные.

Полученная математическая модель электрического поля разработанного многопредельного ТТ в виде (4) позволяет определить электрические и конструктивные параметры изоляции между высоковольтной шиной и низковольтной вторичной обмоткой (рис. 4,5).

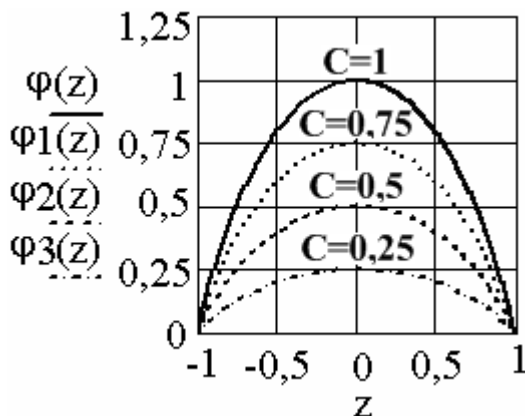


Рис.4. Кривые распределения потенциала электрического поля многопредельного ТТ по координате z при разных значениях коэффициента C

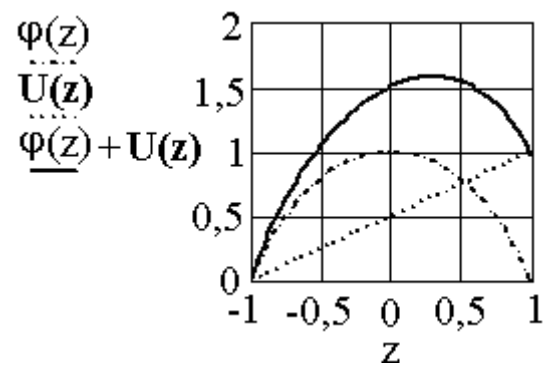


Рис.5. Кривые изменения потенциала и напряжения и их сумма вдоль поверхности изоляции в зависимости от z

В четвертой главе – «Исследование основных характеристик многопредельных трансформаторов тока» – изучены статические и динамические характеристики, погрешность и надежность, а также приведена методика инженерного расчета разработанных многопредельных ТТ.

Полученное на основе математической модели выражение статической характеристики разработанного многопредельного ТТ в комплексной форме имеет вид

$$\dot{I}_2 = \frac{\omega w_1 w_2 \Delta \cdot I_1 e^{j\varphi}}{2\sqrt{(R_{20} + R_H)^2 + \omega^2 (w_2^2 C_\mu + L_{2S} + L_H)^2}}, \quad (5)$$

где $\varphi = \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{\omega(w_2^2 C_\mu + L_{2S} + L_H)}{R_{20} + R_H} + \psi_i$ – угол сдвига фаз между векторами токов $\dot{I}_2, \dot{I}_1$; ψ_i – начальная фаза первичного тока.

Статические характеристики разработанного многопредельного ТТ при разных значениях α приведены на рис. 6. График свидетельствует о том, что при вышеизложенных допущениях они линейны. Расхождение между теоретическими и экспериментальными результатами составляет (3÷5)%.

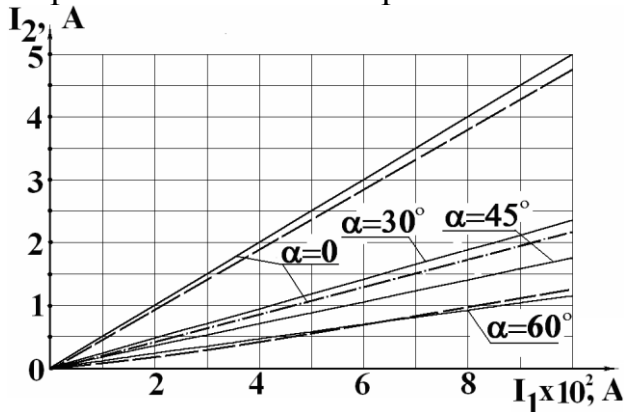


Рис. 6. Статические характеристики многопредельных ТТ при разных значениях α : сплошные кривые – теоретические; пунктирные – экспериментальные; – характеристика прототипа

Динамические характеристики многопредельного ТТ исследованы при наиболее часто встречающемся на практике виде первичного тока

$$i_1 = I_{m1} \sin(\omega t + \psi_i) + I_{1a.H} e^{-t/T_1}.$$

Дифференциальное уравнение, описывающее динамический режим работы многопредельного ТТ, имеет следующий вид:

$$T \frac{di_2(t)}{dt} + i_2 = \omega(T - T_2) \Delta \cdot I_{m1} \times \\ \times \cos(\omega t + \psi_i) - \frac{\Delta \cdot I_{1a.H}}{T_1} e^{-\frac{t}{T_1}} (T - T_2), \quad (6)$$

$$\text{где } T = \frac{L_0 + L_{20} + L_H}{R_{20} + R_H} - \text{постоянная}$$

времени контура, образованного ветвями вторичного тока и намагничивания;

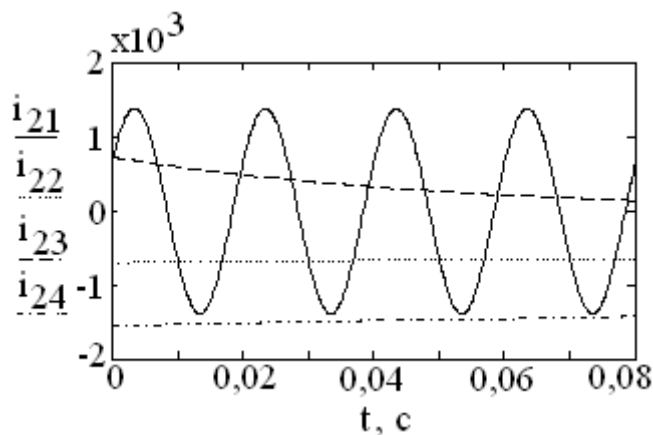
$T_2 = \frac{L_{20} + L_H}{R_{20} + R_H}$ – постоянная времени ветви вторичного тока.

При начальных условиях $i_2(o_-) = i_2(o) = 0$; $i_1(o_-) = i_1(o) = 0$; $I_{1a.H} = -I_{m1} \sin \psi_i$ решение дифференциального уравнения (6) найдено операторным методом, т.е.

$$i_2(t) = \frac{\omega(T-T_2)\Delta \cdot I_{m1}}{\sqrt{1+\omega^2 T^2}} \sin(\omega t + \psi + \varphi) - \frac{\omega(T-T_2)\Delta \cdot I_{m1} e^{-\frac{t}{T}}}{\sqrt{1+\omega^2 T^2}} \sin(\psi + \varphi) +$$

$$\frac{T-T_2}{T-T_1} \Delta \cdot I_{1a.n} e^{-\frac{t}{T_1}} - \frac{T-T_2}{T-T_1} \Delta \cdot I_{1a.n} e^{-\frac{t}{T}} = i_{2np}(t) + i_{2a}(t) = i_{21}(t) + i_{22}(t) + i_{23}(t) + i_{24}(t). (7)$$

Анализ составляющих вторичного тока в динамическом режиме работы многопредельного тока ТТ в соответствии с (7) показал (рис.7), что первый член ($i_{21}(t)$) представляет собой принужденную синусоидальную составляющую, второй член ($i_{22}(t)$) – свободную аperiодическую составляющую,



**Рис. 7. Кривые $i_2(t)$ при $T_1 = 0.05$ с
 $T = 1$ с, $T_2 = 0.016$ с, $\psi = 30^\circ$.**

которая в начальный момент (при $t = 0$) переходного процесса компенсирует периодической составляющей вторичного тока. Третья слагаемая ($i_{23}(t)$) является принужденной аperiодической составляющей вторичного тока. Четвертая слагаемая – свободная аperiодическая составляющая, компенсирующая третью слагаемую в момент коммутации.

Установлено, что при $t = 0$ $i_2(0) = 0$, а при $t = \infty$

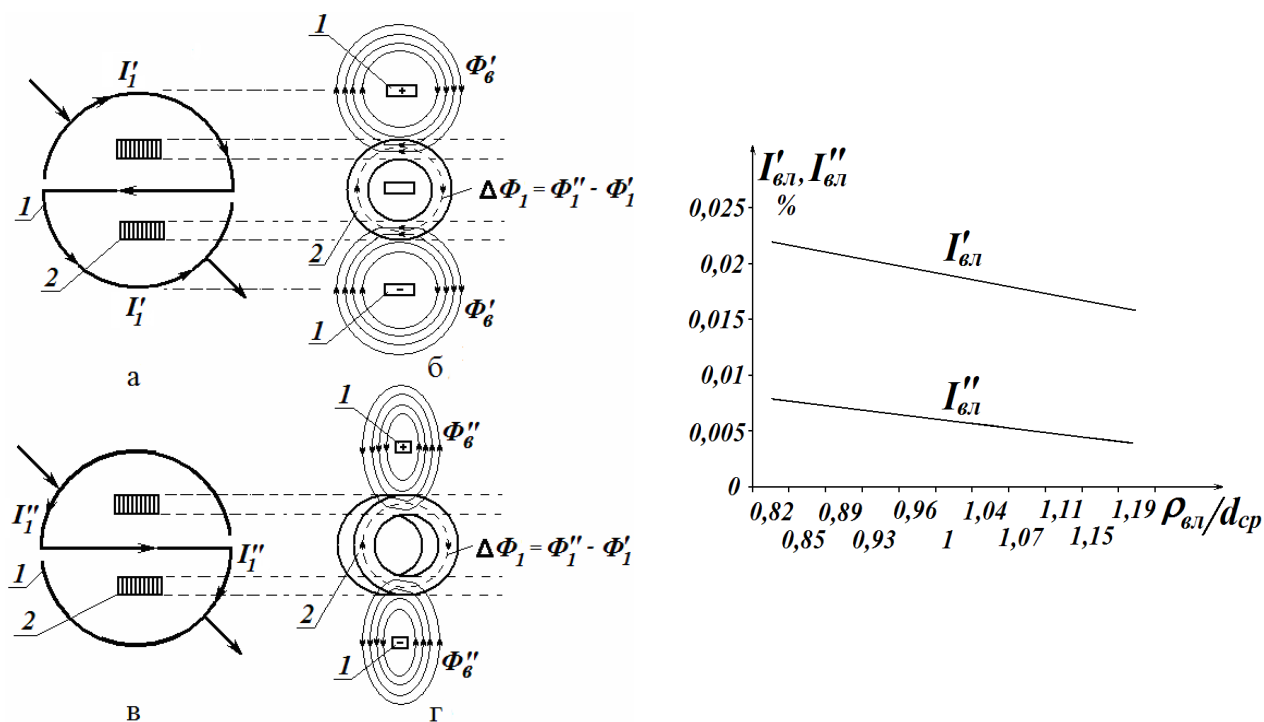
$$i_2(\infty) = \frac{\omega(T-T_2)}{\sqrt{1+\omega^2 T^2}} \Delta I_{m1} \sin(\omega t + \psi_i + \varphi), \quad \text{т.е. равно его установившемуся}$$

значению. Знаки составляющих $i_{22}(t)$ и $i_{24}(t)$ зависят от соотношения между постоянными времени T_1 , T_2 , T . Показано, что при $T = \infty$ периодическая и аperiодическая составляющие тока намагничивания равны нулю и весь первичный ток преобразуется во вторичную цепь ТТ, а при $T = T_2$ весь первичный ток проходит по ветви намагничивания и ток $i_2(t) = 0$.

Анализ работы исследуемых многопредельных ТТ и их основных характеристик показал, что возможными источниками погрешностей являются несовершенство метода, неточность изготовления и сборки, нестабильность характеристик материала сердечника, частоты тока и параметров нагрузки, а также неблагоприятные внешние условия. Составлена их классификация, согласно которой первые три являются источниками основной погрешности, а три остальные – источниками дополнительной погрешности.

Получены аналитические выражения токовой и угловой погрешности с учетом особенностей разработанных многопредельных ТТ. На их основе установлено, что на точность преобразования многопредельных ТТ наибольшее влияние оказывают нестабильность нагрузки и колебания частоты первичного

тока. Исследовано влияние магнитных полей кольцевых частей первичной цепи разработанного многопредельного ТТ (рис. 8). Анализ влияния кривых зависимости первичного тока от относительного расстояния до влияющего токопровода показывает, что погрешность разработанного многопредельного ТТ от влияния магнитных полей кольцевых участков первичной цепи незначительна (например, при $(\rho_{вл} / d_{ср})=1,19$ она составляет 0,016 %) (рис.9).



а, в – кольцевые элементы; б, г – силовые линии нерабочих магнитных полей токов I_1' и I_1'' : 1 – кольцевые элементы; 2 – сердечник

Рис.8. Влияние магнитных полей кольцевых частей первичной цепи на сердечник

Рис.9. Кривые зависимости первичного тока влияния от относительного расстояния до влияющего токопровода

Количественная оценка погрешностей показала, что при допустимых значениях отклонений температуры, частоты первичного тока и параметров нагрузки приведенная погрешность не превышает 0,5%.

В диссертационной работе исследована надежность разработанных многопредельных ТТ. Показано, что вероятность безотказной работы соответствует нормам допустимой надежности. Предложена методика инженерного расчета разработанных многопредельных ТТ, позволяющая определить технические характеристики ТТ на стадии их проектирования.

Применение разработанного многопредельного ТТ в системах управления устройствами электроснабжения электрических железных дорог позволяет

повысить точность управления. При этом годовой экономический эффект составляет 5,3 млн. сум.

В заключении диссертации подведены итоги исследования и сформулированы основные выводы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Изучение вопросов преобразования больших переменных токов в электроэнергетических системах и устройствах, в частности, в системах управления устройствами электроснабжения железнодорожного транспорта, показало, что одной из причин их низкой эффективности являются неудовлетворительные технические характеристики используемых измерительных преобразователей, в их числе преобразователей больших переменных токов. Установлено, что для повышения эффективности работы систем управления и контроля необходимо повысить точность и стабильность характеристик преобразования при динамических режимах работы, обеспечить регулирование (многопредельность) диапазона преобразования измерительных преобразователей больших переменных токов.

2. Сравнительный анализ основных характеристик существующих измерительных преобразователей больших переменных токов показал, что наиболее полно требованиям систем управления и контроля отвечают многопредельные ТТ. Предложена классификация способов осуществления многопредельности ТТ. Установлено, что в существующих многопредельных ТТ многопредельность осуществляется, в основном, регулированием количества витков первичной и вторичной обмоток.

3. Показана целесообразность совместного применения энергоинформационного и морфологического методов поискового проектирования при разработке новых многопредельных ТТ. Установлено, что морфологический синтез многопредельных ТТ по их выбранной структурной схеме позволяет разработать новые ТТ с требуемыми характеристиками без привлечения из автоматизированного банка данных дополнительных физико-технических эффектов. Составление морфологических матриц для каждого физико-технического эффекта параметрической структурной схемы многопредельных ТТ позволяет резко увеличить количество синтезируемых вариантов ТТ и в конечном итоге выбрать их конструкции с требуемыми характеристиками.

4. Предложен способ снижения погрешности ТТ от влияния апериодических составляющих первичного тока при их работе в переходных режимах. Согласно этому способу, магнитная цепь ТТ разделяется на два ветви: первая состоит из магнитопровода с к.з. витком – электромагнитным экраном, а вторая – из магнитопровода с зазором и вторичной обмоткой.

5. Анализ работы разработанных многопредельных ТТ показал, что наиболее полно требованиям систем управления и контроля отвечает ТТ, многопредельность в котором осуществлена путем создания и регулирования противоМДС в первичной цепи. Показано, что они имеют расширенные

функциональные возможности, универсальность применения и относительно высокую точность преобразования в переходных режимах.

6. Разработаны математические модели многопредельного ТТ с линейной и нелинейной кривыми намагничивания. Установлено, что известный принцип выбора расчетных параметров спрямленной характеристики намагничивания не всегда дает желаемую точность расчета электромагнитных и конструктивных параметров ТТ и предложен новый, согласно которому вторую опорную точку наклонного луча спрямленной характеристики намагничивания необходимо определить на основании заданной допустимой погрешности аппроксимации намагничивания.

7. Получены общее и частное аналитические решения уравнения Пуассона для потенциала электрического поля многопредельного ТТ. Выполнен расчет распределения приложенного напряжения и потенциала электрического поля вдоль поверхности изолятора разработанного многопредельного ТТ. Получено выражение и составлена таблица для расчета геометрических размеров изолятора многопредельного ТТ с учетом электрической прочности материала изолятора и коэффициента запаса прочности.

8. Анализ составляющих вторичного тока в динамическом режиме работы многопредельных ТТ показал, что первый член представляет собой принужденную синусоидальную составляющую, второй член – свободную апериодическую составляющую, компенсирующие периодическую составляющую вторичного тока. Третья слагаемая является принужденной составляющей, четвертая слагаемая – свободной апериодической составляющей, компенсирующей третью слагаемую в момент коммутации. Установлено, что знаки второй и четвертой составляющих зависят от соотношения между постоянными времени первичной, вторичной цепей и цепи намагничивания.

9. Выявлено, что основными источниками возможных погрешностей многопредельных ТТ являются несовершенство метода, неточность изготовления и сборки, нестабильность характеристик материала сердечника, частоты тока и параметров нагрузки, а также неблагоприятные внешние условия. На основе анализа полученных аналитических выражений токовой и угловой погрешности установлено, что на точность преобразования многопредельных ТТ наибольшее влияние оказывают нестабильность нагрузки и колебания частоты первичного тока. При этом максимальная приведенная погрешность не превышает $\pm 0,5\%$.

10. Применение разработанного многопредельного ТТ в системах управления устройствами электроснабжения железнодорожного транспорта приводит к повышению точности управления. Экономический эффект от внедрения многопредельного ТТ составляет 5,3 млн. сумов в год.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Амиров С. Ф., Хушбоков Б.Х. Трансформаторы тока с многовитковым сердечником для защиты. // Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте: Тез. докл. Респ. научно-технической конференции с участием зарубежных ученых. 6-7 декабря 2005. В 2-х т. – Ташкент, 2005. Т.2. С. 670-673.
2. Амиров С.Ф., Хушбоков Б.Х., Шойимов Й.Ю. Дистанционные преобразователи больших токов с многовитковыми сердечниками // Вестник ТашИИТ. – Ташкент, 2006. – №1. – С. 162-169.
3. Амиров С.Ф., Хушбоков Б.Х., Сафаров А.М., Шойимов Й.Ю. Вопросы измерения больших токов на железнодорожном транспорте (особенность, состояние и перспектива) // Вестник ТашИИТ. – Ташкент, 2006. – №2. – С. 88-97.
4. Амиров С.Ф., Балгаев Н.Е., Хушбоков Б.Х., Даусеитов Е.Б. Многопредельные трансформаторы тока. // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. – Алматы, 2006. -№4. – С. 126-130.
5. Амиров С.Ф., Хушбоков Б.Х. Трансформаторы тока с многовитковым сердечником для систем управления // Инновация-2006: Тез. докл. международной науч.-практ. конф. 26–27 октября 2006. В 2-х т. – Ташкент, 2006. Т.2. С. 670-673.
6. Амиров С.Ф., Хушбоков Б.Х., Кадыров Дж.Ф., Балгаев Н.Е. Трансформаторы тока для работы в переходных режимах // От легендарного Турксиба к стратегической трансевразийской магистрали: Материалы научно-практической конференции, посвященной 75 – летию со дня начала эксплуатации Турксиба, г. Алматы, 31 мая 2006. В 2-х т. – Алматы, 2006. Т.2. – С. 51-55.
7. Амиров С.Ф., Сафаров А.М., Хушбоков Б.Х. Преобразователи тока для вторичных систем электроэнергетики // Современное состояние и перспективы развития энергетики: Тез. докл. международной научно-технической конференции 18 – 20 декабря 2006. - Ташкент, 2006. –С. 206-208.
8. Амиров С. Ф., Хушбоков Б.Х., Балгаев Н.Э. Вопросы расширения верхнего предела измерения трансформатор тока. // Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте: Сб. науч. тр. Респ. научно-технической конференции с участием зарубежных ученых. –Ташкент, 2006. – С. 43-44.
9. Амиров С.Ф., Хушбоков Б.Х., Балгаев Н.Е. Многопредельные преобразователи тока для систем управления движением поездов // Безопасность движения поездов: Труды VIII Научно-практической конференции. В 2-х частях. – Москва: МИИТ, 2007. Ч.1. – С. V-2.
10. Амиров С.Ф., Хушбоков Б.Х. Датчики тока с многовитковыми сердечниками // Инновационные технологии в управлении, образовании, промышленности «АСТИНТЕХ-2007»: Материалы Всероссийской научной конференции. В 2-х т. – Астрахань, 2007. Т.2. С. 76-78.

11. Амиров С.Ф., Хушбоков Б.Х. Преобразователь переменного тока в напряжение для систем управления силовыми тяговыми цепями электровозов // Материалы научно-технической конференции по проблемам наземных транспортных систем: Сб. науч. тр./ ТашИИТ. – Ташкент, 2007. – с. 183-186.
12. Патент РУз. №03316. Многооборотный бесконтактный потенциометр переменного тока / Амиров С.Ф., Турдибеков К.Х., Шойимов Й.Ю., Саттаров Х.А., Хушбоков Б.Х. // Расмий ахборотнома. – 2007. – №3.
13. Патент РУз. №03591. Устройство для преобразования постоянного тока в переменный / Амиров С.Ф., Халиков А.А., Хушбоков Б.Х., Шойимов Й.Ю., Балгаев Н.Э. // Расмий ахборотнома. – 2008. – №2.
14. Патент РУз. №03617. Устройство для бесконтактного измерения токов / Амиров С.Ф., Халиков А.А., Хушбоков Б.Х., Шойимов Й.Ю., Балгаев Н.Э. // Расмий ахборотнома. – 2008. – №3.
15. Патент РУз. №03858. Трансформатор тока / Амиров С.Ф., Халиков А.А., Хушбоков Б.Х., Шойимов Й.Ю., Балгаев Н.Э. // Расмий ахборотнома. – 2009. – №1.
16. Амиров С.Ф., Хушбоков Б.Х., Балгаев Н.Э. Многодиапазонные трансформаторы тока // Электротехника. – Москва, 2009. – №2. – С. 61-64.
17. Патент РУз. №03893. Датчик угловых ускорений / Амиров С.Ф., Турдибеков К.Х., Саттаров Х.А., Ботиров Х.Э., Хушбоков Б.Х. // Расмий ахборотнома. – 2009. – №3.
18. Амиров С.Ф., Хушбоков Б.Х. Исследование динамических характеристик многопредельного трансформатора тока. // Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте: Сб. науч. тр. Респ. научно-технической конференции с участием зарубежных ученых. 2-3 декабря 2009. – Ташкент, 2009. – С. 72–75.
19. Хушбоков Б.Х. Погрешность многопредельного трансформатора тока от влияния внешних магнитных полей. // Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте: Сб. науч. тр. Респ. научно-технической конференции с участием зарубежных ученых. 2-3 декабря 2009. –Ташкент, 2009. – С. 80-82.

РЕЗЮМЕ

диссертации Хушбокова Бахтиёра Худоймуродовича на тему: «Многопредельные трансформаторы тока для систем управления устройствами электроснабжения железнодорожного транспорта» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 – «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления»

Ключевые слова: многопредельные трансформаторы тока, магнитные цепи, математические модели, аппроксимации, параметрические структурные схемы, характеристики.

Объект исследования: многопредельные трансформаторы тока (ТТ).

Цель работы: разработка и исследование многопредельных трансформаторов тока с расширенными функциональными возможностями и улучшенными динамическими свойствами для систем управления устройствами электроснабжения железнодорожного транспорта.

Методы исследований: теории электрических и магнитных цепей и электромагнитного поля, погрешностей, энергоинформационный и морфологический методы поискового конструирования датчиков и аппарат параметрических структурных схем (ПСС) с применением компьютерной техники, а также экспериментальные методы исследований.

Полученные результаты и их новизна: разработаны новые конструкции многопредельных ТТ с расширенными функциональными возможностями и улучшенными динамическими свойствами, защищенные патентами РУз, и их математические модели; способ снижения погрешности многопредельных ТТ при их работе в переходных режимах.

Практическая значимость: разработанные многопредельные ТТ имеют расширенные функциональные возможности и относительно высокую точность преобразования при работе в переходных режимах. Разработанные математические модели, позволяют на стадии проектирования многопредельных ТТ исследовать их в статическом и динамическом режимах.

Степень внедрения и экономическая эффективность: Разработанный многопредельный ТТ внедрен в производственный процесс на тяговой подстанции «Транспортный» дистанции электроснабжения «Хаваст». При этом годовой экономический эффект составляет 5,3 млн. сум.

Область применения: результаты работы могут быть широко использованы при разработке многопредельных ТТ, предназначенных для систем управления режимами работы устройств электроснабжения на железнодорожном транспорте и в других отраслях народного хозяйства.

Техника фанлари номзоди даражасига талабгор Хушбоқов Бахтиёр Худоймуродовичнинг 05.13.05 –“Ҳисоблаш техникаси ва бошқарув тизимларининг элементлари ва қурилмалари” ихтисослиги бўйича “Темир йўл транспорти электр таъминот қурилмаларини бошқариш тизимлари учун кўп чегарали ток трансформаторлари” мавзусидаги диссертациясининг

РЕЗЮМЕСИ

Таянч сўзлар: кўп чегарали ток трансформатори, магнит занжирлари, математик моделлар, аппроксимация, параметрик структура схемалари, характеристикалар.

Тадқиқот объекти: Кўп чегарали ток трансформаторлари (ТТ).

Ишнинг мақсади: темир йўл транспорти қурилмаларини бошқариш тизими учун функционал имкониятлари кенгайтирилган ва динамик хоссалари яхшиланган кўп чегарали ТТ ларни яратиш ва тадқиқ этиш.

Тадқиқот усули: электр ва магнит занжирлари ва электромагнит майдон, хатоликлар назариялари; датчикларни излаб конструкциялашнинг энергоинформацион усули ва компьютер ёрдамида қўлланиладиган параметрик структура схема(ПСС) аппарати ҳамда экспериментал усуллар.

Олинган натижалар ва уларнинг янгилиги: ЎзР патентлари билан ҳимояланган, кенгайтирилган функционал имкониятли ва яхшиланган динамик хоссали кўп чегарали ТТ янги конструкциялари ва уларнинг математик модели; ўткинчи жараёнларда кўп чегарали ТТ ишлаганда хатоликни камайтириш усули яратилди.

Амалий аҳамияти: яратилган кўп чегарали ТТ сезгирлиги кенг функционал имконият ва ўткинчи жараёнда ишлаганда нисбатан юқори аниқликга эга. Ишлаб чиқилган математик моделлар кўп чегарали ТТ конструкцияларини лойихалаш поғонасида уларни статик ва динамик режимлар учун тадқиқ этиш имконини беради.

Татбиқ этиш даражаси ва иқтисодий самарадорлиги: ишлаб чиқилган Кўп чегарали ТТ “Ховост” электр таъминот дистанциясига қарашли “Транспорт” тортувчи нистанциясида жорий этилди. Иқтисодий самарадорлик бир йилда 5,3 млн. сўмни ташкил этди.

Қўлланиш соҳаси: тадқиқотлар натижасидан темир йўл транспорти ва халқ хўжалигининг бошқа тармоқларидаги электр таъминот қурилмаларини бошқариш тизимларида қўлланиши мумкин бўлган кўп чегарали ТТнинг янги конструкцияларини яратишда кенг фойдаланиш мумкин.

RESUME

Thesis of Hushboqov Bakhtiyor Hudoymurodovich on the scientific degree competition of the doctor of philosophy in techniques on specialty 05.13.05 – “Elements and devices of computer technology and control system”, subject “Multirange current transformers for managerial systems device supply of the railfreight traffic”

Key words: multirange current transformers, magnetic circuits, mathematical models, approximations, parametric structured schemes, characteristics.

Subjects of research: multirange current transformers (TT).

Purpose of work: development and study multirange transformer of the current with extended functional possibility and perfected dynamic characteristic for managerial systems device supply railway.

Methods of research: theories electric and magnetic circuits and electromagnetic field, inaccuracy, energoInformation and morphological methods search construction sensor and device of the parametric structured schemes (PSS) with using the computer technology, as well as experimental methods of the studies.

The results obtained and their novelty: is designed new designs multirange TT of the current with extended functional possibility and perfected dynamic characteristic, protected patent RUz, and their mathematical models; the way of the reduction of inaccuracy multirange TT under their work but connecting mode.

Practical value: designed TT multirange has an extended functional possibility and comparatively pinpoint accuracy transformation when functioning (working) in connecting mode. Designed mathematical models, allow on stage of the designing multirange TT to research them in steady-state dynamic mode.

Degree of embed and economic effectivity: designed multirange TT is introduced and production process on attractive substation “Transport” distances of supply “Xavast”. Herewith, the annual economic effect forms 5,3 million so'ms.

Field of application: results of the work can be are broadly used at development multirange TT, intended for managerial systems and checking state of working device of supply on rail-freight traffics and other branch public facilities.