

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени АБУ РАЙХАНА БЕРУНИ

На правах рукописи
УДК 621.311.314

БАЛГАЕВ Нуржан Ергенович

ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫЕ ДАТЧИКИ БОЛЬШИХ ТОКОВ ДЛЯ СИСТЕМ
КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ

05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники
и систем управления

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ташкент – 2011

Работа выполнена на кафедре «Электроснабжение и микропроцессорное управление» Ташкентского института инженеров железнодорожного транспорта

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Амиров Султон Файзуллаевич

Официальные оппоненты:

Ведущая организация:

Защита состоится «___» 2011 г. в ___ часов на заседании специализированного Совета Д 067.07.01 при Ташкентском государственном техническом университете имени Абу Райхана Беруни по адресу: 100095, Ташкент, Вузгородок, ул. Университетская, 2, ТашГТУ.

С диссертаций можно ознакомиться в библиотеке ТашГТУ.

Автореферат разослан «___» 2011г.

Ученый секретарь
Специализированного совета
доктор технических наук, профессор

Азимов Р.К.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность работы. Контроль и управление режимами работы аппаратурой электропитания железнодорожной автоматики, трансформаторов и выпрямительных агрегатов тяговых подстанций и других устройств систем электроснабжения электрифицированной железной дороги, линий электропередач, тяговых генераторов, электродвигателей тепловозов и электровозов, а также автоматизированный учет вырабатываемой и потребляемой электрической энергии на железнодорожном транспорте основаны на информационных о больших токах, получаемых с помощью датчиков больших токов (ДБТ). Повышение чувствительности и достижение стабильности работы этих датчиков позволяют повысить эффективность применения систем автоматического контроля и управления режимами работы устройств электропитания железнодорожной автоматики и электроснабжения электрифицированных железных дорог. Этот вопрос приобретает еще более важное значение в связи с внедрением в нашей республике высокоскоростного электроподвижного состава. В связи с этим разработка ДБТ повышенной чувствительности и стабильности является актуальной задачей.

Сравнительный анализ основных характеристик существующих ДБТ показывает, что для преобразования больших постоянных, переменных и импульсных токов в системах контроля и управления наиболее приемлемы и перспективны гальваномагнитные датчики больших токов (ГМДБТ).

Степень изученности проблемы. Разработкам и исследованиям ГМДБТ посвящены многочисленные работы, однако практически все они направлены в основном на снижение их погрешности и расширение верхнего предела измерения. Между тем существующие ГМДБТ имеют низкую чувствительность преобразования. Это ограничивает возможности подобных датчиков. Вопросы разработки ГМДБТ повышенной чувствительности, удовлетворяющих требованиям современных систем контроля и управления, все еще остаются недостаточно изученными.

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

Цель исследования. Целью диссертационной работы является разработка и исследование гальваномагнитных датчиков больших токов повышенной чувствительности для систем контроля и управления устройствами электроснабжения железнодорожного транспорта.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели необходимо:

- проанализировать вопросы преобразования больших токов на современном этапе и сформулировать основные требования систем контроля и управления к ДБТ;

- провести сравнительный анализ основных характеристик существующих ДБТ;
- выбрать и обосновать типы ДБТ;
- разработать новые конструкции ГМДБТ повышенной чувствительности;
- разработать математические модели ГМДБТ;
- исследовать основные характеристики ГМДБТ.

Объект исследования – гальваниомагнитные датчики больших токов.

Предмет исследования – разработка математических моделей и исследование основных характеристик.

Методы исследований - теория электрических и магнитных цепей с распределенными параметрами, теория 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. Повышение чувствительности ГМДБТ, увеличением магнитной индукции и количества последовательно соединенных магниточувствительных элементов в рабочем зазоре, путем усовершенствования магнитной системы без увеличения габаритных размеров датчика.

Основные положения, выносимые на защиту:

- ГМДБТ повышенной чувствительности;
- математические модели ГМДБТ;
- методика расчета нелинейных магнитных цепей ГМДБТ;
- результаты исследования основных характеристик ГМДБТ.

Научная новизна. Впервые проведены теоретические и экспериментальные исследования новых ГМДБТ, разработаны их математические модели с учетом распределенности параметров магнитных цепей и нелинейности основной кривой намагничивания материала сердечника. Предложена методика расчета нелинейных магнитных цепей. Новизна технических решений подтверждается тремя основными патентами РУз.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Созданные ГМДБТ имеют высокую чувствительность преобразования. Разработанные математические модели, учитывающие распределенность параметров магнитных цепей и нелинейность основной кривой намагничивания материала стали, позволяют на стадии проектирования ГМДБТ исследовать их в статическом и динамическом режимах. Составленные морфологические матрицы позволяют резко увеличить количество синтезируемых вариантов конструктивных исполнений ГМДБТ и обеспечивают сокращение времени компоновки их скелетной конструкции на этапе поискового проектирования. Применение разработанного ГМДБТ в системах контроля и 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 ГМДБТ внедрен в производственный процесс преобразования тока возбуждения тягового

генератора тепловоза 2ТЭ-10М локомотивного депо «Тинчлик» регионального железнодорожного узла (РЖУ) «Бухара». Устройство и описание новой конструкции ГМДБТ, методики поискового проектирования, исследования статических и динамических характеристик, расчет погрешностей ГМДБТ переданы для использования в учебном процессе Ташкентского института инженеров железнодорожного транспорта и Ташкентского государственного технического университета.

Апробация работы. Основные результаты и положения диссертации доложены и обсуждены на Республиканской научно-технической конференции «Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте» с участием зарубежных ученых (Ташкент, 2006 и 2007гг.), Международной научно-практической конференции «От легендарного Турксиба к стратегической трансевразийской магистрали», посвященной 75-летию со дня начала эксплуатации Турксиба, (Алматы, 2006г.), Всероссийской научно-практической конференции «Безопасность движения поездов» (Москва, 2007г.), Республиканской научно-технической конференции «По проблемам наземных транспортных систем» (Ташкент, 2008г.), Республиканской научно-технической конференции «Ноанъянавий энергия ишлаб чиқаришнинг электротехник, электромеханик ва электротехнологик мажмуаларининг автоматлаштирилган тизимлари ва уларни такомиллаштириш» (Фергана, 2008г.), Республиканской научно-технической конференции «Современное состояние и перспективы усовершенствования преподавания строительных дисциплин» (Ташкент, 2009), Республиканском научном семинаре молодых ученых «Актуальные проблемы инновационных технологий на железнодорожном транспорте» (Ташкент, 2011г.), Республиканской научно-технической конференции «Современные проблемы строительной механики в комплексе железнодорожного транспорта» (Ташкент, 2011), Международной научно-практической конференции «Инновация-2011» (Ташкент, 2011г.).

Опубликованность результатов. Основное содержание диссертации опубликовано в 23 научных трудах, в том числе 1 статья – в международном журнале «Электротехника» (Москва), 2 статьи – в международном научно-техническом журнале «Химическая технология, контроль и управление», 1 статья – в Узбекском журнале «Проблемы информатики и энергетики», 1 статья – в журнале ТГТУ «Проблемы энерго- и ресурсосбережения», 1 статья – в журнале «Вестник Казахской академии транспорта и коммуникации им. М. Тынышпаева», 3 статьи – в журнале «Вестник ТашИИТ», 11 работ – в материалах международных и республиканских конференций. Получены 3 основных патента РУз на изобретения.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, заключения, списка использованной литературы, содержащего 158 отечественных и зарубежных источников и приложений. Работа изложена на 114 страницах компьютерного текста, содержит 59 рисунков, 9 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 – «Состояние вопроса и постановка задачи исследований» – изучаются вопросы преобразования больших токов, условия и режимы работы ДБТ в аппаратах железнодорожной автоматики, системах контроля и управления силовыми цепями тяговых генераторов и двигателей тепловозов и электровозов, устройствами электроснабжения железнодорожного транспорта, в том числе высокоскоростного электрического транспорта. Установлено, что ДБТ, применяемые в системах контроля и управления, должны иметь высокую чувствительность, точность и стабильность характеристик в экстремальных условиях эксплуатации, а также обладать регулируемым диапазоном преобразования и расширенными функциональными возможностями.

Проведен сравнительный анализ и составлена классификация существующих ДБТ. Выявлено, что резистивные ДБТ обладают большой динамической погрешностью (до 5%), их практически невозможно применять в цепях высокого напряжения. Электромеханическим датчикам присущи низкая надежность из-за наличия подвижной части и большая погрешность (до 10%). Магнитомодуляционные датчики тока 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 ДБТ, требуют введения в них схемы авторегулирования тока, средства защиты сердечников от влияния посторонних полей и обладают большой инерционностью. Необходимость получения строго равномерного магнитного поля и наличие большого порога чувствительности существенным образом ограничивают область применения магниторезонансных датчиков. Магнитооптические ДБТ имеют относительно низкую чувствительность, сложность конструктивного исполнения и неоднозначную зависимость преобразуемого тока от угла поляризации света. Основным недостатком трансформаторов тока является их непригодность для преобразования больших постоянных токов. Всем вышеприведенным ДБТ присуща относительно невысокая чувствительность преобразования.

Выявлено, что широкое распространение в настоящее время не только в системах контроля и управления на железнодорожном транспорте, но и в других отраслях народного хозяйства нашли ДБТ, основанные на гальваномагнитных эффектах (ГМЭ) Холла и Гаусса. Существенными достоинствами ГМДБТ являются достаточно высокое быстродействие и возможность преобразования постоянных, переменных и импульсных токов, позволяющие использовать их в системах контроля и управления объектами

с постоянными, переменными и импульсными параметрами и величинами.

Выявлено, что существующие ГМДБТ имеют относительно низкую чувствительность преобразования. Применение высокочувствительных датчиков в системах контроля и управления позволяет повысить точность и улучшить качественные показатели процесса управления. Поэтому дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку ГМДБТ с повышенной чувствительностью.

Сравнительным анализом существующих методов исследования магнитных цепей датчиков было выявлено, что при исследовании магнитных цепей датчиков без подвижной части и с распределенными параметрами, к которым относятся магнитные цепи разработанных ГМДБТ, наиболее эффективным является метод составления схемы замещения с привлечением компьютерной техники и классический метод составления и решения дифференциальных уравнений. Анализ показал, что аппроксимация зависимости удельного магнитного сопротивления стали от индукции $\rho_\mu = f(B)$ в виде квадратного бинома $\rho_\mu = p + qB^2$, достаточно точно описывает эту зависимость в широком диапазоне индукции (0,1–2,0 Тл), где p, q - коэффициенты аппроксимации.

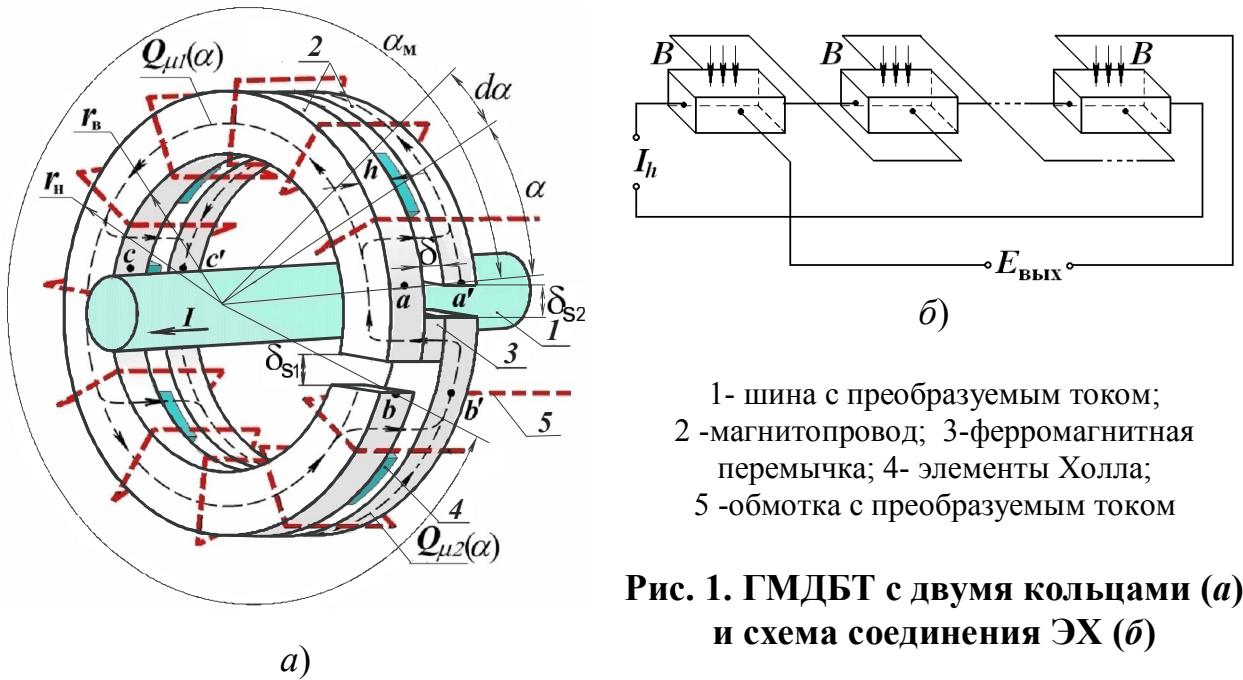
Исходя из результатов анализа литературных источников и в соответствии с поставленной целью, сформулированы основные задачи исследования.

Вторая глава – «Совершенствование гальваномагнитных датчиков больших токов» – посвящена усовершенствованию ГМДБТ с использованием методов технического творчества, в частности, энергоинформационного и морфологического методов поискового конструирования. Установлено, что в качестве концептуальной модели целесообразно использовать энергоинформационную модель цепей (ЭИМЦ), основанную на теории аналогии и подобия, позволяющая описывать процессы и явления различной физической природы с помощью единого математического аппарата. Концептуальная модель ГМЭ с помощью ЭИМЦ позволяет расширить возможности базы данных физико-технических эффектов и увеличить количество синтезируемых ГМДБТ.

Составлены морфологические матрицы (ММ) ГМЭ. Показано, что ММ позволяют на несколько порядков увеличить число вариантов построения ГМДБТ и выбрать один из них, наиболее полно удовлетворяющий поставленным требованиям. Разработаны новые конструкции ГМДБТ. Установлено, что наиболее полно требованиям систем контроля и управления соответствует ГМДБТ, у которого повышение чувствительности осуществлено увеличением магнитной индукции и размещением последовательно соединенных магниточувствительных элементов в рабочем зазоре путем усовершенствования магнитной системы без увеличения габаритных размеров датчика.

ГМДБТ (рис.1), содержит шину 1 с преобразуемым током, магнитопровод 2, выполненный в виде двух параллельно расположенных незамкнутых концентрических колец, разноименные концы которых

соединены между собой ферромагнитной перемычкой 3, элементы Холла (ЭХ) 4, собранные из последовательно соединенных звеньев, расположены в кольцевом зазоре между образующими поверхностями концентрических колец. Проводник с преобразуемым током может быть выполнен в виде обмотки 5, одновременно охватывающей оба концентрические кольца магнитопровода. Благодаря конструктивным изменениям длина ферромагнитной перемычки существенно сокращается, в результате чего уменьшается продольный габаритный размер устройства. Повышение чувствительности достигается суммированием намагничивающих сил обоих колец магнитопровода, а повышение точности достигается получением более равномерного магнитного поля по кольцевому рабочему зазору, где установлены ЭХ. Магнитное сопротивление на пути любого рабочего магнитного потока одинаково. С целью дальнейшего увеличения чувствительности количество концентрических колец может быть увеличено.



**Рис. 1. ГМДБТ с двумя кольцами (а)
и схема соединения ЭХ (б)**

Третья глава – «Анализ магнитных цепей гальваномагнитных датчиков больших токов» – посвящена разработке математических моделей линейных и нелинейных магнитных цепей разработанных ГМДБТ. Определены выражения магнитных потоков в кольцевых сердечниках, магнитного напряжения между ними и магнитной индукции в кольцевом рабочем зазоре в зависимости от координаты расположения ЭХ с учетом распределенного характера магнитного сопротивления магнитопровода, магнитной ёмкости кольцевого рабочего зазора и нелинейности основной кривой намагничивания материала магнитопровода.

При этом, с целью упрощения анализа, пренебрегли магнитным сопротивлением ферромагнитной перемычки ($Z_{\mu 0}$) и боковыми потоками рассеяния. Пренебрежение $Z_{\mu 0}$ было сделано в связи с тем, что длина

ферромагнитной перемычки намного меньше длины концентрических колец и поэтому ошибка, вносимая в расчет не учетом этого сопротивления, незначительна, она остается постоянной и не влияет на потокораспределение в рабочем кольцевом зазоре между концентрическими кольцами. Кроме того, предполагалось, что кольцевые сердечники идентичны, а магнитные емкости нерабочих зазоров δ_{S1} и δ_{S2} одинаковые. Установлено, что эти допущения не вносят ощутимых неточностей в расчеты, однако значительно упрощают анализ.

Упрощенный расчет магнитных цепей известного серийно выпускаемого и разработанного ГМДБТ показал, что при одинаковых материалах, габаритных размерах в рабочем зазоре разработанного ГМДБТ создается магнитное поле с большим значением магнитной индукции, которая растет с увеличением магнитной проницаемости стали магнитопровода.

Предложена методика расчета нелинейных магнитных цепей датчиков с распределенными параметрами методом составления схемы замещения (рис.2). Особенность этой методики заключается в том, что при определении значений магнитных сопротивлений каскадно-соединенных участков цепи, отдельно находятся составляющие удельного магнитного сопротивления стальной части соответствующих участков цепи, появляющихся из-за нелинейности основной кривой намагничивания. Расхождение расчета цепи по этой методике с результатами экспериментальных исследований составило 9-12%.

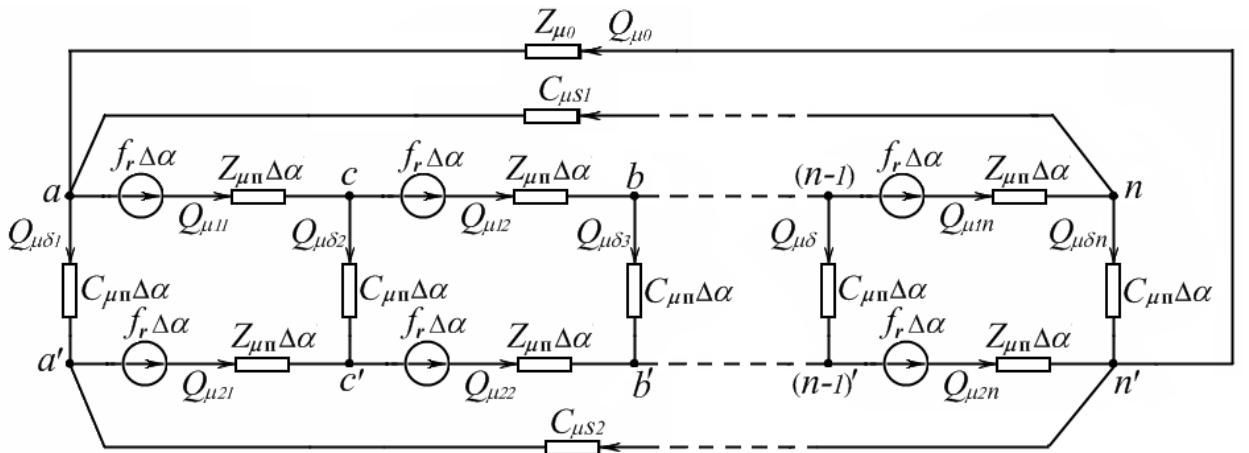


Рис. 2. Схема замещения магнитной цепи разработанного ГМДБТ

Составлены и решены дифференциальные уравнения для линейных и нелинейных магнитных цепей разработанных ГМДБТ с учетом распределенного характера магнитного сопротивления магнитопровода, магнитной ёмкости кольцевых рабочих зазоров и основной кривой намагничивания материала магнитопровода. Ограничимся приведением окончательного выражения магнитной индукции в кольцевом рабочем зазоре между концентрическими кольцевыми сердечниками в виде

$$B_\delta(\alpha^*) = m_1 I^* - m_2 I^{*3}, \quad (1)$$

где

$$m_1 = \frac{\mu_0 I_m}{C_{\mu\pi} \alpha_m \delta} \left\{ 2K_1 - \frac{2\beta_p^2 K_2}{\beta_{cp}^2} sh\left(\frac{\beta_{cp}}{2}\right) + \left(\frac{\beta_p^2 K_2}{\beta_{cp}} \right) ch\left[\beta_{cp}\left(\frac{1}{2} - \alpha^*\right)\right] \right\};$$

$$m_2 = \frac{\mu_0 I_m}{C_{\mu\pi} \alpha_m \delta} \left\{ \left(\frac{3\beta_q^2 K_2}{2\beta_{cp}^2} - \frac{3\beta_q^2 K_2^3}{8\beta_{cp}^2 K_1^2} \right) sh\left(\frac{\beta_{cp}}{2}\right) - \left(\frac{3\beta_q^2 K_2}{4\beta_{cp}} - \frac{3\beta_q^2 K_2^3}{16\beta_{cp} K_1^2} \right) \times \right.$$

$$\left. \times ch\left[\beta_{cp}\left(\frac{1}{2} - \alpha^*\right)\right] - \left(\frac{\beta_q^2 K_2^3}{48\beta_{cp} K_1^2} \right) sh\left[3\beta_{cp}\left(\frac{1}{2} - \alpha^*\right)\right] \right\};$$

$$\text{где в свою очередь } K_1 = \frac{4C_{\mu\pi} \alpha_m sh(\beta_{cp})}{\beta_{cp} \Delta(\beta_{cp})}; \quad K_2 = \frac{8C_{\mu\pi} \alpha_m ch(\frac{\beta_{cp}}{2})}{\beta_{cp} \Delta(\beta_{cp})}; \quad C_{\mu\pi} = \mu_0 \frac{r_h - r_b}{\delta} -$$

погонное значение магнитной ёмкости рабочего кольцевого зазора между концентрическими ферромагнитными сердечниками, приходящееся на единицу угла α магнитной цепи; I , I_m - соответственно преобразуемый ток и его максимальное значение; $I^* = I/I_m$ - значение преобразуемого тока в относительных единицах; α , α_m - угловая координата расположения ЭХ в рабочем кольцевом зазоре и его максимальное значение; $\alpha^* = \alpha/\alpha_m$ - угловая координата в относительных единицах; $\beta_{cp} = \sqrt{\beta_p^2 + 0,5\beta_q^2}$, β_p , β_q - соответственно среднее, начальное значения коэффициента затухания магнитного потока в магнитопроводе и его значение, появляющиеся из-за нелинейности зависимости $B = f(H)$.

Анализ выражения (1) показал, что если в (1) принять $\beta_{cp} = \beta_p = \beta$ (т.е. при $\beta_q = 0$), то получается следующее выражение магнитной индукции в рабочем кольцевом зазоре для линейных магнитных цепей ГМДБТ:

$$B_\delta(\alpha) = \frac{4I\mu_0}{\delta \Delta(\beta)} \{ch[\beta(1 - \alpha^*)] + ch(\beta\alpha^*)\}. \quad (2)$$

$$\text{где } \Delta(\beta) = \beta[1 + ch(\beta)](Z_{\mu\pi} \alpha_m C_{\mu S} + 1) + \frac{\beta^2}{2} sh(\beta); \quad C_{\mu S_1} = C_{\mu S_2} = C_{\mu S} = \mu_0 \frac{h(r_h - r_b)}{\delta_s} -$$

магнитные ёмкости нерабочих зазоров δ_{S1} и δ_{S2} ; $Z_{\mu\pi 1} = Z_{\mu\pi 2} = Z_{\mu\pi} = \rho_{\mu cp} \frac{1}{(r_h - r_b)h}$

- погонные значения магнитных сопротивлений концентрических ферромагнитных сердечников; $\rho_{\mu cp} = \rho_{\mu min} + \frac{\rho_{\mu max} - \rho_{\mu min}}{2}$, $\rho_{\mu min}$ и $\rho_{\mu max}$ - соответственно среднее, минимальное и максимальное значения удельного магнитного сопротивления стали.

Выражения (1) и (2) являются математическими моделями магнитных цепей разработанных ГМДБТ. Показано, что математическая модель линейных магнитных цепей ГМДБТ является лишь частным случаем математической модели нелинейных магнитных цепей ГМДБТ.

На рис. 3 приведены кривые зависимости $B_\delta = f(\alpha^*)$ при разных значениях β_p , построенные в соответствии с выражением (1), а на рис.4 - кривые зависимости $B_\delta = f(\alpha^*)$, построенные на основе результатов, полученных методом составления схемы замещения и классическим методом без учета и с учетом β_q , а также экспериментальная кривая.

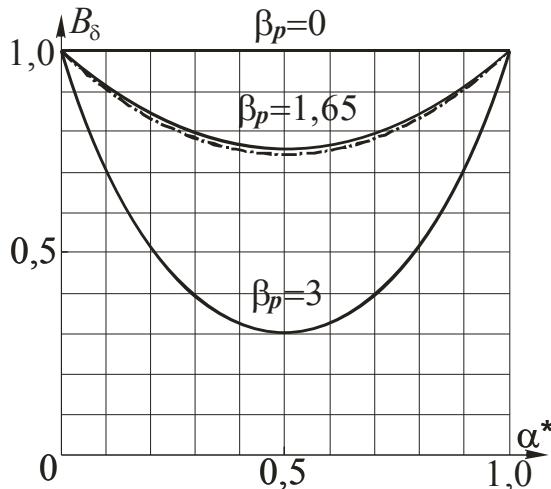
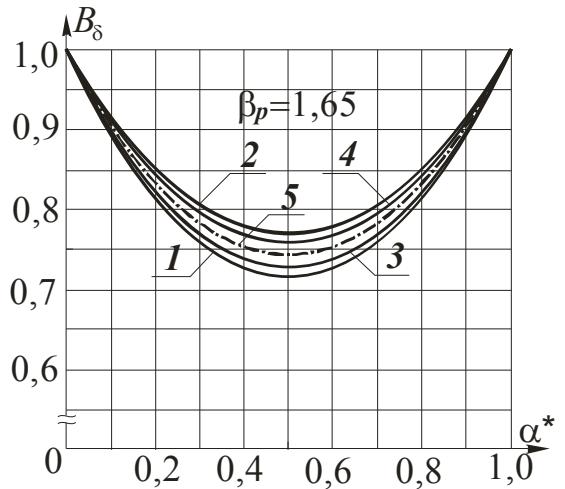


Рис. 3. Кривые зависимости $B_\delta = f(\alpha^*)$ при разных значениях β_p



1, 3 - методом схемы замещения соответственно при $\beta_q = 0$ и $\beta_q \neq 0$; 2, 4 - классическим методом соответственно при $\beta_q = 0$ и $\beta_q \neq 0$; 5 – экспериментальная кривая

Рис. 4. Кривые зависимости $B_\delta = f(\alpha^*)$

Анализ кривых (рис. 4) показывает, что расхождение между результатами эксперимента и расчетов методом составления схемы замещения при $\beta_q = 0$ ($\beta_q \neq 0$) составляет 13-15% (9-12%), классическим методом – 11-13% (5-7%). Следует отметить, что при увеличении количества каскадно-соединенных участков цепи при расчете методом составления схемы замещения резкое повышение точности расчета не наблюдается.

Анализ полученных математических моделей магнитных цепей разработанного ГМДБТ и соответствующих им кривых показал, что с увеличением коэффициента затухания магнитного потока в магнитопроводе нелинейность распределения магнитного потока в кольцевых сердечниках и непостоянство магнитной индукции в кольцевом рабочем зазоре по угловой координате размещения ЭХ увеличиваются. Установлено, что если отношение длины нерабочего зазора к рабочему будет не менее 2,0, а величина магнитной проницаемости стали будет не менее $5 \cdot 10^2$, то магнитный поток рассеяния в нерабочих зазорах составит менее 3% рабочего магнитного потока и им можно пренебречь. Показано, что величиной, характеризующей влияние нелинейности основной кривой намагничивания материала магнитопровода $B = f(H)$ на степень непостоянства магнитной индукции в кольцевом рабочем зазоре (δB) является коэффициент затухания

магнитного потока в магнитопроводе (β_q), появляющийся из-за нелинейности зависимости $B = f(H)$ и отношения β_q к начальному значению коэффициента β_p . Установлено, что увеличение отношения β_q/β_p тем больше влияет на δB , чем больше коэффициент β_p .

В четвертой главе – «Исследование основных характеристик гальваномагнитных датчиков больших токов» – изучены статические и динамические характеристики, погрешность и надежность.

Полученное выражение статической характеристики имеет следующий вид:

$$U_{\text{вых}}^* = m_3 I^* - m_4 I^{*3}, \quad (3)$$

где $m_3 = K_{B_\delta U_{\text{вых}}} m_1$; $m_4 = K_{B_\delta U_{\text{вых}}} m_2$; $K_{B_\delta U_{\text{вых}}}$ – коэффициент преобразования индукции в выходное напряжение ГМДБТ.

На рис.5 приведены расчетные и экспериментальная кривые статических характеристик разработанного ГМДБТ при разных значениях α^* .

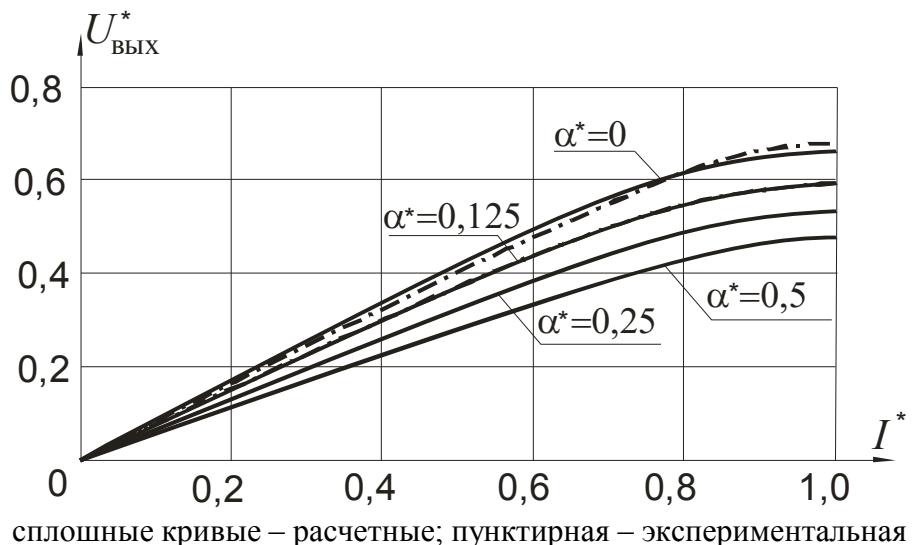


Рис. 5. Кривые статических характеристик разработанного ГМДБТ при разных значениях α^*

Анализ выражения (3) и кривых зависимости $U_{\text{вых}} = f(I^*)$ при разных значениях α^* показал, что с ростом α^* угол наклона кривых статических характеристик уменьшается. Расхождение между расчетными и экспериментальными данными составляет 8 – 13 %.

Найдено выражение средней чувствительности ГМДБТ

$$S_{\text{ср.м}} = m_3 - m_4 I^{*2}. \quad (4)$$

Анализ кривых зависимости средней чувствительности от преобразуемого тока при разных значениях α^* и $\beta_q^* = \beta_q/\beta_p$ (рис.6) показал, что с ростом значений I^* , α^* и β_q^* средняя чувствительность уменьшается.

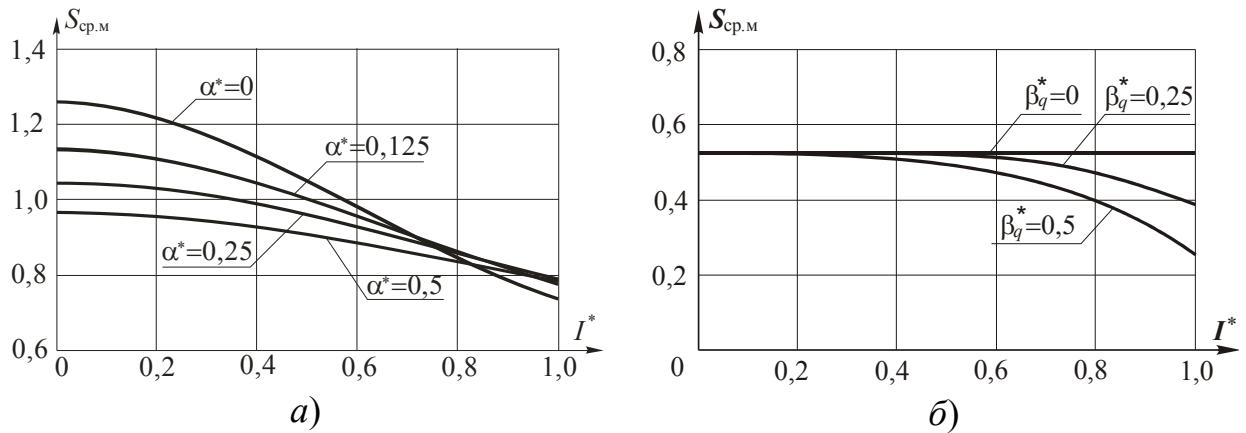


Рис. 6. Кривые зависимости средней чувствительности от преобразуемого тока при разных значениях α^* (а) и β_q^* (б)

На рис. 7 приведены кривые зависимости степени нелинейности статической характеристики $\varepsilon, \% = f(\beta_q)$ при разных значениях β_p .

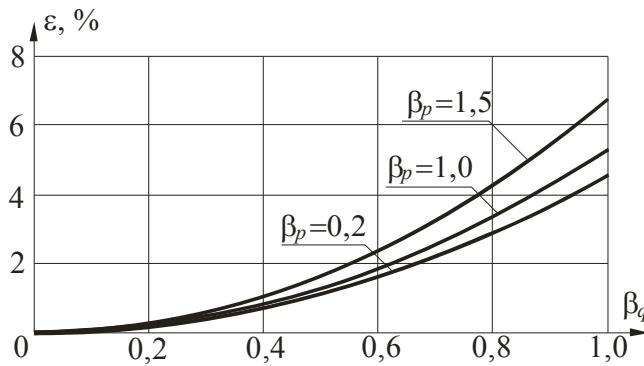


Рис. 7. Кривые зависимости $\varepsilon, \% = f(\beta_q)$ при разных значениях β_p

скачкообразного постоянного тока и питание токовых электродов ЭХ постоянным или синусоидальным током синусоидального тока и питание токовых электродов ЭХ синусоидальным током. Получены выражения переходного напряжения для этих режимов. В частности, для наиболее сложного режима (подача на вход датчика синусоидального тока и питание токовых электродов синусоидальным током), выражение переходного напряжения имеет вид

$$U_{\text{вых}(4)}(t) = \frac{K_{Q_\mu U_3} K_{I_3 U_\mu} I_{\text{exm}} C_\mu}{2\sqrt{1 + \omega_{\text{ex}}^2 R_\mu^2 C_\mu^2}} [\cos[(\omega_h - \omega_{\text{ex}})t + \psi_h - \psi_{\text{ex}} + \varphi] - \cos[(\omega_h + \omega_{\text{ex}})t + \psi_h + \psi_{\text{ex}} - \varphi] - 2e^{-\frac{t}{R_\mu C_\mu}} \sin(\omega_h t + \psi_h) \sin(\psi_{\text{ex}} - \varphi)], \quad (5)$$

Построенные кривые свидетельствуют о том, что рост степени нелинейности статической характеристики разработанного ГМДБТ тем больше, чем больше коэффициенты β_p и β_q , тем меньше поперечные размеры кольцевых сердечников при выбранном материале магнитопровода.

Динамические характеристики разработанных ГМДБТ исследованы при следующих режимах: подача на вход датчика

питание токовых электродов ЭХ постоянным или синусоидальным током; подача на вход датчика питание токовых электродов ЭХ постоянным или синусоидальным током. Получены выражения переходного напряжения для этих режимов. В частности, для наиболее сложного режима (подача на вход датчика синусоидального тока и питание токовых электродов синусоидальным током), выражение переходного напряжения имеет вид

где $I_{\text{вхм}}$ - амплитудное значение преобразуемого тока; $K_{I_3 U_\mu} = I_{\text{вх}} \cdot$ коэффициент эффекта ампервитков; $K_{Q_\mu U_3} = \frac{R_h I_{\text{вх}}}{S_\mu d}$ - коэффициент межцепного эффекта Холла; $I_{\text{вх}}$ - ток источника питания, подключенного к токовым электродам ЭХ, А; S_μ - площадь рабочего зазора, где установлены ЭХ; d - толщина пластины, м; R_μ , C_μ , L_μ - соответственно параметры сопротивления, емкости и индуктивности магнитной цепи; $\omega_{\text{вх}}$, ω_h , $\psi_{\text{вх}}$, ψ_h - соответственно частоты и начальные фазы преобразуемого тока и тока источника питания ЭХ; $\varphi = \arctg(\omega_{\text{вх}} R_\mu C_\mu)$.

Анализ выражения (5) показал, что при постоянном преобразуемом токе и при питании ЭХ постоянным током, установившееся напряжение тоже постоянное. Если же одна из величин переменная, то на выходе датчика возникает переменное напряжение той же частоты, что и частота преобразуемого или питающего тока. Если преобразуемый и питающий токи имеют разные частоты, то выходное установившееся напряжение состоит из суммы двух составляющих. В частном случае, когда преобразуемый и питающий токи имеют одинаковую частоту, выходное установившееся напряжение имеет постоянную составляющую и переменную двойной частоты.

Анализ работы исследуемых ГМДБТ и их основных характеристик показал, что возможными источниками погрешностей являются несовершенство метода, неточность изготовления и сборки, нестабильность характеристик материала ЭХ и сердечника, амплитуда и частота тока питания, а также неблагоприятные внешние условия. Составлена их классификация, согласно которой первые три являются источниками основной погрешности, а три остальные – источниками дополнительной погрешности. Для выявления источников погрешностей и их анализа использованы известные понятия аддитивной и мультиплективной погрешностей.

Установлено, что измерение ЭДС Холла связано с затруднениями, обусловленными появлением ряда дополнительных ЭДС, вызванных побочными эффектами. В частности, погрешности от появления ЭДС термоэлектрического эффекта составляет 0,63 %, от ЭДС Эттинггаузена (поперечного гальванотермомагнитного эффекта) – 0,0011 %, от ЭДС Риги-Ледюка – 0,01 %, от ЭДС Нернста (термогальваномагнитного эффекта) – 0,15 %, от ЭДС Пельтье-Нернста (электротермического эффекта Пельтье и термогальваномагнитного эффекта) – 0,0017 %, от ЭДС магниторезистивного эффекта – 0,37 %. Установлено, что погрешность разработанных ГМДБТ от неучета нелинейной характеристики магнитного сопротивления материала магнитопровода (стали) тем больше, чем больше отношение β_q / β_p и она будет расти с увеличением β_p . Исследования влияния внешних магнитных полей на показания разработанных ГМДБТ, показали, что самым неблагоприятным случаем, является, когда направление внешнего

магнитного поля совпадает с направлением рабочего магнитного потока. При этом приведенная погрешность от влияния внешних магнитных полей составила 0,05-0,15%. Количественная оценка погрешностей показала, что на точность ГМДБТ наибольшее влияние оказывают колебания амплитуды и частоты тока источника питания токовых электродов ЭХ, а также температура окружающей среды. При их допустимых отклонениях максимальная приведенная погрешность не превышает 1,5 %.

В работе исследована надежность ГМДБТ. Показано, что вероятность безотказной работы разработанного ГМДБТ соответствует нормам допустимой надежности.

Применение разработанного ГМДБТ для преобразования тока возбуждения тягового генератора в системе автоматического управления дизель-генератором тепловоза позволило повысить точность управления. При этом годовой экономический эффект составил 7,8 млн. сум.

В заключение диссертации подведены итоги исследования и сформулированы основные выводы.

В приложении диссертации приведены основные соотношения энергоинформационной модели цепей различной физической природы и аппарата параметрических структурных схем, паспорта гальваномагнитных эффектов, а также акт внедрения и справки об использовании результатов диссертации в учебном процессе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Изучение вопросов преобразования больших токов в силовом оборудовании систем электроснабжения железнодорожного транспорта и аппаратуры железнодорожной автоматики показало, что одной из причин их низкой эффективности являются неудовлетворительные технические характеристики систем контроля и управления, в частности, применяемых в них ДБТ. Сравнительный анализ основных характеристик существующих ДБТ показал, что наиболее полно требованиям систем контроля и управления отвечают ГМДБТ.

2. Установлено, что в качестве концептуальной модели ГМЭ целесообразно использовать ЭИМЦ, основанную на теории аналогии и подобия, позволяющая описывать процессы и явления в ГМДБТ с помощью единого математического аппарата, которая расширить возможности базы данных физико-технических эффектов и увеличить количество синтезируемых ГМДБТ.

3. Разработаны новые конструкции ГМДБТ. Установлено, что наиболее полно требованиям систем контроля и управления соответствует ГМДБТ, у которого повышение чувствительности осуществлено увеличением магнитной индукции и размещением последовательно соединенных магниточувствительных элементов в рабочем зазоре путем усовершенствования магнитной системы без увеличения габаритных размеров датчика.

4. Анализ полученных математических моделей разработанного ГМДБТ и соответствующих им кривых показал, что с увеличением коэффициента затухания магнитного потока в магнитопроводе (β) нелинейность распределения магнитного потока в кольцевых сердечниках и непостоянство магнитной индукции в кольцевом рабочем зазоре по координате размещения ГМЭ увеличиваются. Установлено, что если отношение нерабочего зазора к рабочему будет не менее 2,0 и магнитная проницаемость стали не менее $5 \cdot 10^2$, то магнитный поток рассеяния составит менее 3% от рабочего магнитного потока и им можно пренебречь. Показано, что математическая модель линейных магнитных цепей ГМДБТ является частным случаем математической модели нелинейных магнитных цепей ГМДБТ.

5. Предложена методика расчета нелинейных магнитных цепей датчиков с распределенными параметрами методом составления схемы замещения. Особенность этой методики заключается в том, что при определении значений магнитных сопротивлений каскадно-соединенных участков цепи отдельно находятся составляющие удельного магнитного сопротивления стальной части соответствующих участков цепи, появляющихся из-за нелинейности основной кривой намагничивания. Расхождение расчета цепи по этой методике с результатами экспериментальных исследований составило 9-12 %.

6. Анализ статических характеристик разработанного ГМДБТ при разных значениях координаты размещения ГМЭ α^* показал, что с ростом α^* угол наклона кривых статической характеристики уменьшается. Установлено, что степень нелинейности статической характеристики разработанного ГМДБТ тем больше, чем больше коэффициенты β_p и β_q , т.е. чем меньше поперечные размеры кольцевых сердечников при выбранном материале магнитопровода. Расхождение между расчетными и экспериментальными данными составляет 8 – 13 %.

7. Исследование погрешности показало, что наибольший вклад в погрешность измерения ЭДС ГМДБТ вносят ЭДС неэквипотенциальности и термоЭДС почти для всех полупроводниковых материалов. Установлено, что погрешность от неучета нелинейной характеристики магнитного сопротивления материала магнитопровода (стали) тем больше, чем больше отношение β_q/β_p и она будет расти тем скорее, чем больше β_p .

8. Применение разработанного ГМДБТ в системах контроля и управления технологическими процессами, в частности, в системе автоматического управления дизель-генератором современного тепловоза для преобразования тока возбуждения тягового генератора приводит к повышению точности контроля и управления. Экономический эффект от внедрения датчика составляет 7,8 млн. сум в год.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. 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.
2. 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.
3. Амиров С.Ф., Хушбоков Б.Х., Балгаев Н.Е. Вопросы расширения верхнего предела измерения трансформатора тока// Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте: Сб. науч. труд. респ. научно-технической конференции с участием зарубежных ученых. – Ташкент, 2006. – С. 43-44.
4. Амиров С.Ф., Балгаев Н.Е., Джураева К.К. Магнитогальванический преобразователь больших токов // Материалы Республиканской научно-технической конференции с участием зарубежных ученых «Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте». – Ташкент, 2007. – С. 120-123.
5. 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 ч. – Москва: МИИТ, 2007. (Ч.1) – С. V-2.
6. Амиров С.Ф., Балгаев Н.Е., Джураева К.К., Шойимов Й.Ю. О магнитогальванических эффектах, применяемых в преобразователях больших токов // Материалы научно-технической конференции «Проблемы наземных транспортных систем». – Ташкент, 2008. (Ч-II) – С. 225-228.
7. Балгаев Н.Е., Джураева К.К. Исследование гальваномагнитных датчиков систем управления // Сборник научных трудов Республиканской научно-технической конференции «Ноанъянавий энергия ишлаб чиқаришнинг электротехник, электромеханик ва электротехнологик мажмуаларининг автоматлаштирилган тизимлари ва уларни такомиллаштириш». – Фергана, 2008. С. – 95-96.
8. Ибрагимов Р.Ш., Балгаев Н.Е. Вопросы повышения эффективности автоматизированных систем контроля и учёта расхода электроэнергии на железнодорожном транспорте // Сборник научных трудов Республиканской научно-технической конференции «Ноанъянавий энергия ишлаб чиқаришнинг электротехник, электромеханик ва электротехнологик мажмуаларининг автоматлаштирилган тизимлари ва уларни такомиллаштириш». – Фергана, 2008. С. – 86-87.
9. Патент РУз. №03591. Устройство для преобразования постоянного тока в переменный / Амиров С.Ф., Халиков А.А., Балгаев Н.Е., Хушбоков

- Б.Х., Шойимов Й.Ю. // Расмий ахборотнома. – 2008. – №2.
10. Патент РУз. №03617. Устройство для бесконтактного измерения токов / Амиров С.Ф., Халиков А.А., Балгаев Н.Е., Хушбоков Б.Х., Шойимов Й.Ю. // Расмий ахборотнома. – 2008. – №3.
11. Патент РУз. №03858. Трансформатор тока / Амиров С.Ф., Халиков А.А., Балгаев Н.Е., Хушбоков Б.Х., Шойимов Й.Ю. // Расмий ахборотнома. – 2009. – №1.
12. Амиров С.Ф., Хушбоков Б.Х., Балгаев Н.Е. Многодиапазонные трансформаторы тока // Электротехника. – Москва, 2009. – №2. – С. 61-64.
13. Амиров С.Ф., Балгаев Н.Е. Концептуальная модель эффекта Холла // Вестник ТашИИТ. – Ташкент, 2009. – №2. – С. 48-58.
14. Амиров С.Ф., Балгаев Н.Е. Энергоинформационная модель эффекта Холла // Сборник научных трудов Республиканской научно-технической конференции «Современное состояние и перспективы усовершенствования преподавания строительных дисциплин». – Ташкент, 2009. – С. 45-46.
15. Амиров С.Ф., Балгаев Н.Е. Математические модели магнитных цепей гальваномагнитных датчиков больших токов // Вестник ТашИИТ. – Ташкент, 2010. – №4. – С. 32-37.
16. Амиров С.Ф., Суллиев А.Х., Балгаев Н.Е. Краткий обзор методов расчета магнитных цепей с распределенными параметрами // Проблемы энерго- и ресурсосбережения. – Ташкент, 2010. – № 1/2. – С. 195-202.
17. Балгаев Н.Е. Энергоинформационные модели магниторезистивных эффектов // Сборник научных трудов Республиканской научно-технической конференции «Актуальные проблемы инновационных технологий на железнодорожном транспорте». – Ташкент, 2011. С. – 167-168.
18. Амиров С.Ф., Балгаев Н.Е. Анализ линейных магнитных цепей гальваномагнитных датчиков больших токов// Кимёвий технология. Назорат ва бошқарув. – Ташкент, 2011 – № 1. – С. 75-80.
19. Амиров С.Ф., Балгаев Н.Е. Исследование динамических характеристик гальваномагнитных датчиков больших токов // Вестник ТашИИТ. – Ташкент, 2011. – № 2. – С. 43-47.
20. Амиров С.Ф., Балгаев Н.Е., Шаропов Ш.А. Исследование магнитных цепей гальваномагнитных датчиков больших токов // Проблемы информатики и энергетики. – Ташкент, 2011. – № 3. – С. 44-50.
21. Амиров С.Ф., Балгаев Н.Е. Методика расчета нелинейных магнитных цепей датчиков с распределенными параметрами// Кимёвий технология. Назорат ва бошқарув. – Ташкент, 2011 – № 4. – С. 45-49.
22. Амиров С.Ф., Балгаев Н.Е. Исследование нелинейных магнитных цепей гальваномагнитных датчиков больших токов // Сборник научных трудов Республиканской научно-технической конференции «Современные проблемы строительной механики в комплексе железнодорожного транспорта». – Ташкент, 2011. – С. 81-86.
23. Балгаев Н.Е. Гальваномагнитные датчики больших токов// Сборник научных статей международной научной конференции «Инновация-2011». – Ташкент, 2011. – С. 221-222.

РЕЗЮМЕ

диссертации Балгаева Нуржана Ергеновича на тему: «Гальваномагнитные датчики больших токов для систем контроля и управления» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 – «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления»

Ключевые слова: гальваномагнитный датчик больших токов, магнитная цепь, математическая модель, аппроксимация, параметрическая структурная схема, характеристика.

Объект исследования: гальваномагнитные датчики больших токов (ГМДБТ).

Цель работы: разработка и исследование гальваномагнитных датчиков больших токов повышенной чувствительности для систем контроля и управления устройствами электроснабжения железнодорожного транспорта.

Методы исследований: теория электрических и магнитных цепей с распределенными параметрами, теория погрешностей, энергоинформационный и морфологический методы поискового конструирования датчиков и аппарат параметрических структурных схем с применением компьютерной техники, а также экспериментальные методы исследований.

Полученные результаты и их научная новизна: разработаны новые конструкции ГМДБТ повышенной чувствительности, защищенные патентами РУз, их математические модели с учетом распределенности параметров магнитных цепей и нелинейности основной кривой намагничивания материала сердечника, предложена новая методика расчета нелинейных магнитных цепей ГМДБТ.

Практическая значимость: разработанные ГМДБТ имеют высокую чувствительность. Разработанные математические модели и методика расчета нелинейных магнитных цепей, учитывающие распределенность параметров магнитных цепей и нелинейность основной кривой намагничивания материала сердечника, позволяют на стадии проектирования ГМДБТ исследовать их в статическом и динамическом режимах.

Степень внедрения и экономическая эффективность: Разработанный ГМДБТ внедрен в производственный процесс для преобразования тока возбуждения тягового генератора тепловоза 2ТЭ-10М локомотивного депо «Тинчлик» регионального железнодорожного узла «Бухара». Годовой экономический эффект составил 7,8 млн. сум.

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

Техника фанлари номзоди даражасига талабгор Балгаев Нуржан Ергеновичнинг 05.13.05 –“Ҳисоблаш техникаси ва бошқарув тизимларининг элементлари ва қурилмалари” ихтисослиги бўйича “Назорат ва бошқариш тизимлари учун катта токлар гальваномагнит датчиклари” мавзусидаги диссертациясининг

РЕЗЮМЕСИ

Таянч сўзлар: катта токлар гальваномагнит датчиклари, магнит занжирлар, математик моделлар, аппроксимация, параметрик структура схемалар, тавсифлар.

Тадқиқот обьекти: катта токлар гальваномагнит датчиклари (КТГМД).

Ишнинг мақсади: темир йўл транспорти электр таъминоти қурилмаларини назорат ва бошқариш тизимлари учун юқори сезгирикли катта токлар гальваномагнит датчикларини яратиш ва тадқиқ этиш.

Тадқиқот усули: тарқоқ параметриларни электр ва магнит занжирлари назарияси, хатоликлар назарияси, датчикларни дастлабки лойиҳалашнинг энергоинформацион ва морфологик усуслари ҳамда параметрик структура схемалар аппарати компьютер техникасидан фойдаланган ҳолда, шунингдек текширишнинг экспериментал усуслари.

Олинган натижалар ва уларнинг янгилиги: ЎзР патентлари билан химояланган юқори сезгирикли КТГМД янги конструкциялари яратилган, магнит занжирлар параметрларининг тарқоқлигини ва ўзак материали асосий магнитланиш эгри чизифининг начизиқлигини ҳисобга олган ҳолда уларнинг математик моделлари яратилган ҳамда начизиқ магнит занжирларни ҳисоблашнинг янги услуби таклиф этилган.

Амалий аҳамияти: яратилган КТГМД юқори ўзгартириш сезгирилигига эга. Ўзак материалининг асосий магнитланиш эгри чизифининг начизиқлигини ҳисобга олувчи математик моделлар ва начизиқ магнит занжирларни ҳисоблаш услуби КТГМД лойиҳалаш босқичида уларни статик ва динамик режимларда текшириш имконини беради.

Тадбиқ этиш даражаси ва иқтисодий самараадорлиги: яратилган КТГМД “Бухоро” минтақавий темир йўл узелининг “Тинчлик” локомотив депосида 2ТЭ-10М тепловози тортиш генераторининг қўзғатувчи токини ўзгартириш учун ишлаб чиқариш жараёнига тадбиқ этилган. Йиллик иқтисодий самараадорлик 7,8 млн. сўмни ташкил этди.

Қўлланиш соҳаси: тадқиқот натижалари темир йўл электр таъминоти ва халқ ҳўжалигининг бошқа тармоқларидағи электр қурилмалар иш режимларини бошқариш тизимлари учун мўлжалланган КТГМДларни лойиҳалашда кенг фойдаланилиши мумкин.

The RESUME

of dissertation Balgaev Nurzhan Ergenovicha on a theme: «Galvanomagnetic sensors of the high currents for monitoring systems and management» on competition of a scientific degree of the doctor of philosophy in technical direction on a specialty 05.13.05 - «Elements and devices of computer facilities and control systems»

Key words: The Galvanomagnetic sensors of the high currents, magnetic chain, mathematical model, approximation, the parametrical block diagramme, the characteristics.

Subjects of research: galvanomagnetic sensors of the high currents (GSHC).

Purpose of work: development and research of Galvanomagnetic sensors of the high currents of a hypersensitivity for monitoring systems and management of devices of electrosupply of a railway transports.

Methods of research: the theory of electric and magnetic chains with the distributed parametres, the theory of errors, energoinformation and morphological methods of search designing of sensors and the device of parametrical block diagram's with application of computer techniques, and also experimental methods of researches.

The results obtained and their novelty: are developed the new designs GSHC of a hypersensitivity protected by patents RUz, their mathematical models taking into account distribution of parametres of magnetic chains and nonlinearity of the basic curve of magnetisation of a material of the core, the new calculation method of nonlinear magnetic chains GSHC.

Practical value: the developed GSHC have high sensitivity. The developed mathematical models and a calculation method of nonlinear magnetic chains with the distributed parametres, considering nonlinearity of the basic curve of magnetisation of a material of the core, allow to investigate on design stage GSHC them in static and dynamic modes.

Degree of embed and economic affectivity: the developed GSHC it is introduced in production for transformation of a current of excitation of the traction generator of a diesel locomotive 2TЭ-10M locomotive depot "Tinchlik" of a regional railway junction "Bukhara". Annual economic benefit has made 7,8 million sum's in a year.

Field of application: results of work can be widely used by working out of the GSHC, intended for control systems of operating modes of devices of electrosupply on a railway transportation and in other branches of a national economy.

Научный соискатель:

Подписано к печати ___. ___. 2011. Объем 2,25 п.л.
Формат 60×84 1/16. Тираж 100 экз. Заказ ___.
Отпечатано в типографии _____