**Джикаев Георгий Вячеславович. Измерительные преобразователи больших переменных токов в электроэнергетике : Дис. ... канд. техн. наук : 05.11.01 : Ульяновск, 2004 176 c. РГБ ОД, 61:05-5/845**

Федеральное агентство по образованию
Ульяновский Государственный Технический Университет

*На правах рукописи*

**ДЖИКАЕВ ГЕОРГИЙ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ**

**Измерительные преобразователи больших
переменных токов в электроэнергетике**

Специальность 05.11.01 - Приборы и методы измерений по видам измерений (электрические измерения) технические науки

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук
*Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Казаков М.К.*

УЛЬЯНОВСК 2004

**Перечень основных сокращений**

АП - аддитивная погрешность

БПТ - большие переменные токи

ДЦУ - дифференциальный усилитель

ИН - интегратор напряжения

ИПБПТ - измерительный преобразователь больших переменных токов

ИПТ - измерительный преобразователь тока

ИТТ - измерительный трансформатор тока

ПР - пояс Роговского

СК - спиральная катушка

ФПС - фильтр постоянной составляющей

АЦП - аналого-цифровой преобразователь

ООС - отрицательная обратная связь

ОУ - операционный усилитель

АЦИ - аналоге - цифровой интегратор

**з**

**Содержание**

[Перечень основных сокращений 2](#bookmark1)

ВВЕДЕНИЕ 6

Глава первая. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ИЗМЕРЕНИЙ БОЛЬШИХ ПЕРЕМЕННЫХ ТОКОВ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

1. [Цели и особенности измерения БПТ 11](#bookmark8)
2. [Средства измерений больших переменных токов 13](#bookmark9)
3. [Электрометрические преобразователи переменного тока 17](#bookmark10)
4. [Магнитооптические преобразователи переменного тока 18](#bookmark11)
5. [Магнитные компараторы переменного тока 20](#bookmark12)
6. [Измерительные трансформаторы тока 21](#bookmark14)
7. Измерительные преобразователи тока на основе пояса Роговского.... 23
8. [Выводы 27](#bookmark19)

Глава вторая. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ БОЛЬШИХ ПЕРЕМЕННЫХ ТОКОВ НА ОСНОВЕ ПОЯСА РОГОВСКОГО

1. [Постановка задачи исследования 28](#bookmark20)
2. [Магнитный поток витка обмотки пояса Роговского 30](#bookmark21)
3. [Токопроводы больших переменных токов.... 32](#bookmark24)
4. [Погрешности ИПТ на основе пояса Роговского 33](#bookmark25)
5. [Погрешность от паразитной емкости 34](#bookmark26)
6. [Погрешность от неравномерной намотки обмотки пояса 38](#bookmark27)
7. [Погрешность от наклона витка 46](#bookmark42)
8. Способ повышения точности измерения ИН Г на основе пояса

Роговского 48

1. Способ повышения надежности ИПТ на основе пояса Роговского 51
2. [Эффективная площадь обмотки пояса Роговского 54](#bookmark46)
3. ЭДС обмотки пояса Роговского при использовании спиральных

катушек 58

1. Использование ИПТ на основе пояса Роговского при различных

сечениях токопровода 60

1. Устройство сопряжения пояса Роговского с измерительными

устройствами 62

2.12. Выводы 65

Глава третья. ИНТЕГРАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ

[3.1 Постановка задачи исследования 67](#bookmark57)

1. [Классификация интеграторов напряжения 67](#bookmark58)
2. [Погрешность типового аналогового интегратора напряжения 69](#bookmark60)
3. Способ коррекции нулевого уровня интегратора периодической

разрядкой интегрирующего конденсатора 72

1. Способ коррекции нулевого уровня интегратора введением цепи

коррекции по постоянному напряжению 83

1. Способ коррекции АП изменением направления интегрирования

напряжения смещения 90

1. Способ выборочного интервального интегрирования напряжения.... 95
2. [Аналого — цифровой интегратор 102](#bookmark76)
3. [Цифровой интегрирующий измеритель 107](#bookmark77)
4. [Выводы 114](#bookmark78)

Глава четвертая. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА

1. Компенсационные измерительные трансформаторы тока 116
2. Двухкаскадные ИТТ с использованием компенсационных

трансформаторов тока 118

1. [Коррекционный трансформатор тока 123](#bookmark83)
2. Выводы 126

Глава пятая. ИССЛЕДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ТОКА

НА ОСНОВЕ ПОЯСА РОГОВСКОГО

1. Инструментальные погрешности ИПТ на основе пояса Роговского... 127
2. Пояс Роговского для измерения тока в высоковольтных цепях 129
3. Пояс Роговского для измерения тока свыше 10 кА 133
4. Цифровой интегрирующий измеритель 136
5. [Интегратор аналогового напряжения 139](#bookmark88)
6. Выводы 146

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 148

[Библиографический список используемой литературы 151](#bookmark90)

[Приложение 1. Фильтр постоянной составляющей 156](#bookmark91)

Приложение 2. Аналого-цифровой интегратор 158

Приложение 3. Программное обеспечение контроллера для цифрового

интегрирующего измерителя 163

[Приложение 4. Программное обеспечение измерителя 170](#bookmark96)

Приложение 5. Программа анализа погрешности программной части измерителя 176

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Развитие электроэнергетики на современном этапе сопровождается увеличением значений рабочих напряжений и токов. Это тре­бует переоснащения парка измерительных приборов устройствами с более со­вершенными принципами измерения.

В системе мероприятий по экономии и рациональному использованию энергоресурсов особо важное место занимают вопросы повышения точности и расширения диапазона измерения токов. Это связано, например, с установлени­ем оптимальных режимов работы оборудования и ведения технологических процессов.

Получение информации о больших токах связано с особыми трудностями, поскольку их непосредственное измерение невозможно. Это предполагает ис­пользование промежуточных устройств - измерительных преобразователей (ИП), задачей которых является представление информации в наиболее удоб­ном для использования (в данном случае - измерения) виде.

Точность получения информации и объем выполнения требуемых задач (в частности задач по экономии энергоресурсов) в значительной степени опреде­ляется уровнем погрешностей, диапазоном измерения и другими характеристи­ками ИП, что делает актуальным поиск путей дальнейшего совершенствования этих устройств, тем более что известные решения часто не дают желаемых ре­зультатов.

Решению этих проблем посвящены работы Болотина И.Б., Андреева Ю.А., Абрамзона Г.В., Лейтмана Н.Б., Семенко Н.Г., Гамазова Ю.А..

Несмотря на значительное количество работ в этой области, необходимо отметить два важных момента. Во-первых, большинство работ выполнены до­вольно давно и не соответствуют современному уровню развития измеритель­ной техники, а во-вторых, состояние системы метрологического обеспечения является в общем не удовлетворительно в масштабах нашей страны. Это связа­но с трудностями поверки измерительных трансформаторов, что приводит к тому, что многие устройства не поверяются многие годы. Кроме этого, такие трансформаторы морально устарели, имеют большие массогабаритные харак­теристики, не разъемную конструкцию и сдерживают развитие современных автоматизированных систем.

Таким образом, учитывая современные требования по экономии и рацио­нальному использованию энергоресурсов, необходимость повышения точности измерения больших переменных токов и трудность решения этой задачи с по­мощью известных методов, можно сделать вывод об актуальности поиска но­вых способов преобразования больших переменных токов.

Целью диссертационной работы является совершенствование принци­пов построения средств измерения больших переменных токов для улучшения технико-экономических показателей устройств при их использовании в элек­троэнергетике.

Поставленная цель определила основные задачи исследования.

1. Анализ современных решений, связанных с измерениями больших переменных токов (БПТ) в электроэнергетике.
2. Совершенствование измерительных трансформаторов тока.
3. Исследование пояса Роговского на предмет измерения БПТ в электроэнерге­тике.
4. Разработка переносной конструкции пояса. Определение его погрешностей и путей их снижения.
5. Совершенствование принципов постороения аналоговых и цифровых интеграторов напряжения.
6. Разработка цифрового интегрирующего измерителя действующего значения.

Методы исследований базировались на теории электрических цепей, теории электромагнитного поля. Применялись класические разделы математического анализа. Проверка основных выводов проводилась посредством компьютерных экспериментов.

Работа проводилась на цикле «ТОЭ и ОЭ» кафедры «Электроснабжение» Ульяновского государственного технического университета, научный руководитель - д.т.н., профессор Казаков М.К.

Структура диссертации. В первой главе проведен обзор работ, посвященных измерительным преобразователям больших переменных токов, сформулированы и отмечены достоинства и недостатки известных преобразователей.

Во второй главе проводится исследование пояса Роговского на предмет измерения БПТ в электроэнергетике и оценки его погрешности, с целью ее снижения, при использовании переносной конструкции. Определены пути сни­жения методических погрешностей. Предложен способ повышения точности измерения и способ повышения надежности пояса, основанные на выполнении обмотки из спиральных катушек (СК).

Третья глава посвящена интеграторам напряжения. Интегратор является важным узлом измерительного преобразователя больших переменных токов на основе пояса Роговского. Проведен анализ известных способов и схем интегрирования. Разработаны новые способы коррекции нулевого уровня и новые схемы интеграторов, имеющие лучшие метрологические характеристики по сравнению с известными. Рассмотрен цифровой интегирующий измеритель напряжения.

Четвертая глава посвящена измерительным трансформаторам тока (ИТТ). Разработаны схемы компенсационных трансформаторов тока, позволяющие снизить погрешности ИТТ за счет использования двух ступеней трансформа­ции. Предложен новый путь снижения погрешности преобразования - форми­рование сигнала, пропорционального сумме токов ветви намагничивания и вто­ричной цепи (коррекционный трансформатор тока).

В пятой главе проведено исследование инструментальных погрешностей измерительного преобразователя тока на основе пояса Роговского, цифрового интегрирующего измерителя, реализованного численными методами, и аналогового интегратора напряжения.

**Научная новизна работы заключается в следующем.**

1. Предложен способ повышения точности измерения тока с помощью пояса Роговского, заключающийся в выполнение обмотки в виде последовательно соединенных спиральных катушек.
2. Разработан способ повышения надежности пояса Роговского на основе использования спиральных катушек, позволяющий создать разъемную конструкцию, что важно для переносных устройств.
3. Предложен способ интегрирования аналогового напряжения позволяющий повысить точность выполнения этой операции.

**Практическая ценность работы состоит в следующем.**

1. Показана возможность применения пояса Роговского для измерения больших переменных токов в электроэнергетике без разрыва токопровода.
2. Исследованы погрешности измерения тока с помощью пояса Роговского и предложены пути их снижения.
3. Предложена конструкция пояса Роговского в виде последовательно соединеных калиброванных датчиков, которая позволяет проводить, измерения на токопроводах различного сечения.
4. Предложены пути совершенствования измерительных трансформаторов индукционного типа на основе использования двухступенчатой трансформации и создания коррекционного трансформатора.
5. Проведен анализ погрешностей измерения тока при использовании измерительного преобразователя тока (ИНТ) на основе пояса Роговского, что позволило разработать несколько вариантов конструкций пояса Роговского для использования в различных цепях.
6. Предложены схемы аналоговых интеграторов, позволяющие повысить точность интегрирования.
7. Рассмотрен алгоритм цифрового интегрирующего измерителя действующего значения, реализованного численными методами.
8. Предложена новая технология изготовления обмоток низкочастотных трансформаторов тока, в частности - пояса Роговского, на основе использования печатного монтажа.

Реализация работы.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на ежегодных научно-технических конференциях преподавателей и сотрудников Ульяновского государственного технического университета с 1999 по 2004 гг., на 3-ей Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем» (Ульяновск, 2001г.), на 4-ой Российской научно-технической конференции «Энергосбережение в городстком хозяйстве, энергетике, промышленности» (Ульяновск, 2003 г.). Результаты исследований использованы при выполнении госбюджетной научно-исследовательской работы «Исследование режимов электроснабжения постоянных, переменных токов при создании измерительных устройств на базе современных достижений микроэлектроники» (отчет по НИР, номер госудорственной регистрации №01960008652, Ульяновск, 2000 г.).

Результаты диссертационной работы использованы в ЗАО «Контактор» (г.Ульяновск) и ОП «Барышские электрические сети» (Ульяновская обл., г.Барыш) для измерения больших переменных токов промышленной частоты.

По результатам выполненых исследований опубликовано 28 печатных работ, в том числе 8 патентов на изобретения, 9 патентов (свидетельств) на полезную модель и одна публикация в центральной печати.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Проблема измерения больших переменных токов остается актуальной на протяжении многих десятилетий. При этом возникают задачи повышения точ­ности измерений и улучшения технико-экономических показателей устройств для измерения больших переменных токов, что вытекает в свою очередь в со­вершенствование принципов построения средств измерений. Представленные в диссертации материалы позволяют сделать вывод о достижении поставленной цели, что выражается в получении следующих основных результатов.

1. Проведен анализ состояния проблемы измерения больших переменных то­ков в электроэнергетике, рассмотрены принципы измерения токов, указаны их достоинства и недостатки, что позволило выбрать направление исследо­ваний.
2. Предложены решения по совершенствованию широко используемых в элек­троэнергетике измерительных трансформаторов тока, что позволило повы­сить точность его измерения. Предложен, в частности, новое решение по снижению погрешности за счет формирования сигнала, пропорционального току намагничивания, что нашло выражение в разработке коррекционного трансформатора тока.
3. Проведен анализ погрешностей измерения тока с помощью пояса Роговского с учетом реальных размеров витка, что позволило использовать полученные результаты для: разработки измерительных преобразователей тока (ИПТ) с относительно малым отношением радиусов витка обмотки и пояса Роговско­го; создания переносных конструкций И11Т; рассмотрения путей снижения погрешностей измерения.
4. Предложен способ повышения точности измерения ИПТ на основе пояса Ро­говского, основанный на выполнении обмотки из последовательно соеди­ненных спиральных катушек (СК), позволяющий исключить погрешность от наклона витка обмотки, исключить намотку в навал и обеспечить заданное количество витков обмотки, уменьшить длину намоточного провода.
5. Предложен способ повышения надежности ИПТ на основе пояса Роговского, который позволяет выполнить пояс на эластичном каркасе, и повысить тех­нологичность изготовления пояса. Даны рекомендации по размещению вит­ковых секторов на общем каркасе, и по выполнению соединения между ни­ми.
6. Предложено выполнять пояс Роговского круглой формы из последовательно соединенных калиброванных участков по длине и количеству витков, что позволяет использовать пояс для измерения токов протекающих по токопро­водам различных размеров. Даны рекомендации по выполнению калибро­ванных участков и пояса.
7. Предложены схемы аналоговых интеграторов напряжения, позволяющие повысить точность интегрирования переменного напряжения в режиме дли­тельного интегрирования.
8. Рассмотрен способ коррекции аддитивной погрешности интеграторов изме­нением направления интегрирования напряжения смещения для источников сигналов с изменяемой полярностью (пояс Роговского), а также с неизме­няемой полярностью.
9. Предложен способ выборочного интервального интегрирования, позволяю­щий снизить погрешность от интегрирования входных токов и напряжения смещения используемого операционного усилителя.
10. Предложен вариант выполнения цифрового интегрирующего измерителя, выполняющего операцию интегрирования, который позволяет проводить индикацию и регистрацию действующего значения выходного сигнала. Из­меритель может быть выполнен как переносной образцовый, с возможно­стью использования в автоматизированных системах.
11. Проведен анализ общей погрешности пояса Роговского. Результаты показа­ли, что погрешность может составить не более 0,02 % при соотношении ра­диуса пояса и размера витка *Ья =* 0,06; относительном смещении 5 < 0,1; от­носительном удалении не менее 5ст= 16.
12. Исследования показали, что ИПТ на основе пояса Роговского можно исполь­зовать для прецизионных измерений тока в электроэнергетике, в частности токов промышленной частоты, как основу для создания ИПТ класса 0,2 и ниже.