

Бедарева Елена Вячеславовна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
КОАКСИАЛЬНЫХ ШУНТОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

Специальность 05.11.01 – Приборы и методы измерения
(измерение электрических и магнитных величин)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель: **Муравьев Сергей Васильевич**,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Бирюков Сергей Владимирович**
доктор технических наук, профессор кафедры
физики Омского государственного технического университета

Майстренко Андрей Васильевич,
кандидат технических наук, доцент кафедры
электронных устройств автоматизации и
управления Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники

Ведущая организация: **ОАО "НПЦ Полюс"**, г. Томск

Защита состоится «__» _____ 2014 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: Россия, 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215 (актовый зал).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/916/worklist>

Автореферат разослан _____ 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук



Е.А. Васендина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. При испытаниях силовоточного электротехнического и электроэнергетического оборудования (мощных трансформаторов, силовых размыкателей, коммутаторов, защитных устройств, предохранителей и т.д.) качественная регистрация динамического поведения больших переменных токов в режиме короткого замыкания и в переходном режиме является одной из важнейших задач. При этом необходимо контролировать параметры изменения во времени как тестового сигнала, так и процессов в объекте испытаний. Для регистрации этих параметров необходимо иметь обладающие достаточной точностью измерительные преобразователи тока.

В качестве измерительных преобразователей тока произвольной формы традиционно используются широкополосные импульсные трансформаторы тока, датчики на эффекте Холла, пояс Роговского и резистивные шунты. С помощью трансформаторов тока можно измерять большие токи в широком частотном диапазоне, однако они подвержены влиянию внешних магнитных полей, могут входить в насыщение из-за токов короткого замыкания и имеют сравнительно высокую стоимость. Пояс Роговского требует применения интегрирующего устройства для определения параметров выходного сигнала и чувствителен к внешним магнитным полям. Перспективными для измерений импульсных и переменных токов остаются датчики Холла, но для них требуются внешние источники питания, и их свойства сильно зависят от температуры.

Наиболее подходящими для измерений больших токов сложной формы являются безындуктивные шунты, благодаря малой стоимости, высоким метрологическим характеристикам и сравнительной простоте изготовления. При регистрации больших быстроизменяющихся токов первостепенное значение приобретают динамические характеристики этих преобразователей.

Динамической называется характеристика, описывающая поведение шунта во временной и/или частотной областях. К таким характеристикам относятся амплитудно-частотная (АЧХ), фазочастотная (ФЧХ) и переходная характеристики.

Большой вклад в теоретические и экспериментальные исследования динамических характеристик токовых преобразователей внесли зарубежные и отечественные ученые, например, Силсби Ф.Б., Малевски Р., Филиппски П.С., Векслер М.С., Теплинский А.М., Болотин И.Б., Эйдель Л.З., Соудерс Т.М., Джонсон С.М. и др. Ими установлено, что на динамические свойства шунтов основное влияние оказывают собственная паразитная индуктивность и такие нежелательные явления как поверхностный эффект и эффект близости. Применение коаксиальной конструкции резистивного элемента шунта позволяет устранить проявление эффекта близости, повысить помехоустойчивость, уменьшить собственную индуктивность. Поэтому коаксиальные шунты могут обеспечить потенциально более высокие динамические характеристики по сравнению с другими видами шунтов.

Измерения и контроль параметров современного силовоточного оборудования требуют дальнейшего расширения динамического и частотного диапазонов используемых для этой цели резистивных преобразователей при сохране-

нии и даже повышении их точности. В связи с этим актуально дальнейшее совершенствование динамических характеристик коаксиальных шунтов переменного тока.

Целью диссертационной работы является разработка и исследование методов и средств совершенствования динамических характеристик коаксиальных сильноточных шунтов, предназначенных для регистрации токов сложной формы.

В связи с поставленной целью в работе сформулированы и решены следующие **задачи**:

1. анализ и выбор конструкции токового резистивного преобразователя, обеспечивающего измерение переменных токов в широких динамическом (до десятков килоампер) и частотном (до сотен килогерц) диапазонах;
2. исследование факторов, влияющих на динамические характеристики коаксиальных шунтов;
3. разработка и программная реализация методики расчета геометрических и электрических параметров токовых шунтов, включая динамические характеристики;
4. разработка методов экспериментальных исследований метрологических характеристик шунтов на переменном токе и их апробация на изготовленном прототипе коаксиального шунта.

Методы исследования. Теоретическая часть работы выполнена на основе теории электромагнетизма, теории погрешностей, математического моделирования, дифференциального и интегрального исчисления. При расчетах и моделировании использовались программные пакеты ANSYS, LabVIEW, MathCAD, MATLAB.

Достоверность полученных результатов диссертационной работы подтверждается совпадением с достаточной на практике точностью экспериментальных данных, полученных при апробации коаксиального шунта с применением эталонных средств измерений, с результатами моделирования и теоретических исследований. Экспериментальные исследования проводились в лабораторных и производственных условиях с использованием современных прецизионных средств измерений, прошедших периодическую поверку.

Научная новизна

1. На основе анализа полного сопротивления коаксиального шунта предложен метод расширения его частотного диапазона не менее чем в три раза, с использованием амплитудных корректоров первого порядка.
2. Разработана и программно реализована методика инженерного расчета геометрических и электрических параметров безындуктивных токовых шунтов, включая динамические характеристики, с учетом результатов исследований их тепловых свойств и конструктивных особенностей.
3. Разработано и апробировано основанное на нулевом методе устройство для экспериментального определения малых значений комплексного сопротивления шунта в заданном диапазоне частот (защищен патентом на полезную модель РФ 139577).

4. Предложен метод экспериментального определения амплитудно- и фазо-частотных характеристик токового шунта, основанный на совместной цифровой обработке входного короткого импульсного воздействия и отклика на него; частотная зависимость коэффициента передачи шунта рассчитывается с помощью компонентов комплексных спектральных преобразований напряжений с выходов шунта и эталонного преобразователя тока (защищен патентом на изобретение РФ 2528588).

Практическая ценность работы. Результаты проведенной работы могут быть использованы для разработки и усовершенствования методов и средств измерений, направленных на определения амплитудных и временных параметров больших переменных токов, а также могут применяться при разработке методик аттестаций и измерений испытательного оборудования в измерительных лабораториях.

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты исследований по теме диссертации использованы для выполнения при непосредственном участии автора следующих НИР:

- грант ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на проведение исследований по теме «Прецизионные резистивные и индуктивные преобразователи с улучшенными динамическими характеристиками», 2010-2012 гг., госконтракт № 1.387С.2010;
- грант ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России» на проведение исследований по теме «Программно-аппаратный комплекс для автоматизированных испытаний сильноточных преобразователей», 2011-2013 гг., госконтракт № 11.519.11.6026;
- грант РФФИ по теме «Исследование метрологических характеристик резистивных преобразователей переменного тока», 2013 г., госконтракт № 13-08-90748 мол_рф_нр.

Результаты работы используются в ОАО "Новосибирский завод химконцентратов" (ОАО НЗХК) для регистрации амплитудных и временных параметров тока источников питания контактной сварки.

Акты внедрения приложены к диссертационной работе.

Положения, выносимые на защиту

1. Предложенный в работе метод расширения частотного диапазона коаксиального шунта с использованием амплитудных корректоров первого порядка на основе активной RL -цепи позволяет не менее чем в три раза увеличить верхнюю граничную частоту при затухании на уровне 1 %.
2. Алгоритм определения геометрических и электрических параметров безындуктивных токовых шунтов, включая динамические характеристики, положенный в основу разработанной инженерной методики расчета шунтов, учитывает как их тепловые свойства, так и конструктивные особенности.
3. Разработанное на основе нулевого метода устройство для измерения малых значений комплексного сопротивления шунта в частотном диапазоне, ограниченном возможностями многозначной меры.

4. Разработанный метод экспериментального определения амплитудно- и фазочастотных характеристик токового шунта, основанный на совместной цифровой обработке входного короткого импульсного воздействия и отклика на него, позволяет определять верхнюю граничную частоту коэффициента передачи шунта с помощью компонентов комплексных спектральных преобразований напряжений с выходов шунта и эталонного преобразователя тока.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- XVII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии СТТ 2011», г. Томск, 2011 г.;
- IX Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием «Молодежь и современные информационные технологии МСИТ-2011», г. Томск, 2011 г.;
- VIII Международная научно-практическая конференция «Метрологическое обеспечение учета электрической энергии», г. Киев, Украина, 2011 г.;
- XIX Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии СТТ 2013», г. Томск, 2013 г.;
- XIX Международный симпозиум ИМЕКО ТК 4, г. Барселона, Испания, 2013 г.
- XX Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии СТТ 2014», г. Томск, 2014 г.

Публикации. Основные результаты исследований отражены в 16 публикациях: шесть статей в ведущих научных журналах и изданиях, рекомендуемых ВАК; две статьи в рецензируемых научных журналах; шесть статей в сборниках трудов международных и российских конференций; патент на полезную модель и патент на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 106 наименований и приложений. Работа содержит 155 страниц основного текста, включая 73 рисунков и 17 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель исследований, определены решаемые задачи, указаны научная новизна и практическая ценность результатов работы.

В первой главе «Безындуктивные резистивные преобразователи переменного тока» проведены патентные исследования и анализ отечественных и зарубежных источников, посвященных безындуктивным резистивным преобразователям больших переменных токов.

В общем случае токовый шунт представляет собой измерительный преобразователь входного переменного тока в пропорциональное ему выходное переменное напряжение, фазовый сдвиг между которыми должен быть равен нулю. Такой резистивный преобразователь включается в электрическую цепь по четырехзажимной схеме, в которой входной ток подается на токовые выводы (ТВ), а выходное напряжение снимается с потенциальных выводов (ПВ).

Известна рассмотренная Векслером М.С. и Теплинским А.М. электрическая модель шунта переменного тока, состоящая из активного сопротивления $R_{\text{ш}}$, индуктивности L и емкости C . Поскольку для измерений больших переменных токов используют шунт с сопротивлением менее 0,1 Ом, влиянием паразитной емкости можно пренебречь вплоть до высоких частот. Тогда комплексный коэффициент преобразования $\dot{Z}$ шунта определяется выражением:

$$\dot{Z} = R_{\text{ш}} + j\omega L. \quad (1)$$

Отношение комплексного коэффициента преобразования $\dot{Z}$ шунта к его активному сопротивлению $R_{\text{ш}}$ (на постоянном токе) можно представить в виде:

$$\frac{\dot{Z}}{R_{\text{ш}}} = 1 + \frac{R_{\text{ш}}}{\Delta R} + j\Psi \quad (2)$$

где $\frac{R_{\text{ш}}}{\Delta R}$ – относительная активная составляющая погрешности, учитывающая изменение комплексного коэффициента преобразования шунта $\dot{Z}$, вызванная влиянием паразитных эффектов (поверхностного эффекта и эффекта близости);

ΔR – приращение активного сопротивления за счет влияния паразитных эффектов;

Ψ – реактивная составляющая погрешности, учитывающая изменение комплексного коэффициента преобразования шунта $\dot{Z}$, вызванная влиянием паразитного магнитного поля.

Выражению (2) соответствуют модель и векторная диаграмма, представленные на рисунке 1.

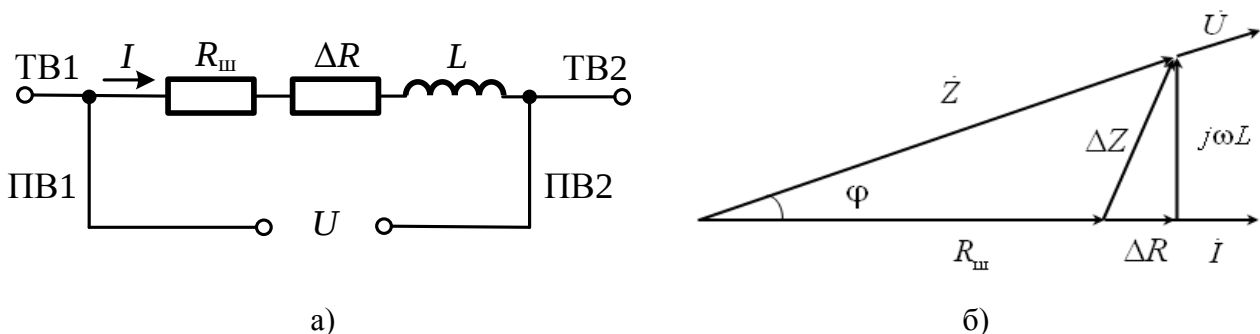


Рисунок 1 – Модель (а) и векторная диаграмма (б) шунта переменного тока

Из выражения (2) следует, что на динамические характеристики шунта влияют его собственная индуктивность и паразитные эффекты. Паразитные эффекты существенно изменяют активное сопротивление токового преобразователя с повышением частоты.

Известно, что одним из способов улучшения динамических характеристик

является изменение конструкции резистивного элемента шунта, направленное на уменьшение его индуктивности и влияния паразитных эффектов. В частности бифилярная конструкция шунта, содержащая проводники с прямым и обратным направлением тока, позволяет существенно снизить собственную индуктивность.

Применяются следующие виды бифилярных конструкций шунтов переменного тока: плоский, дисковый, стержневой и коаксиальный. Проведенный сравнительный анализ этих конструкций показал, что предпочтительной для измерений больших переменных токов в широкой полосе частот является коаксиальная конструкция шунта, благодаря малой стоимости, отсутствию эффекта близости, высокой помехоустойчивости и температурной стабильности сопротивления. Конструктивно коаксиальный шунт состоит из двух вложенных друг в друга цилиндров, по которым ток протекает в противоположных направлениях. Внешний цилиндр изготавливается из имеющей малое удельное сопротивление меди, а внутренний – из резистивного материала с большим удельным сопротивлением, например манганина.

Во второй главе «Аналитическое описание коаксиальных шунтов переменного тока» рассмотрены и исследованы факторы, влияющие на функцию преобразования, предложены амплитудные корректоры, позволяющие улучшить динамические характеристики коаксиального шунта.

Здесь и далее исследования проводились на примере прототипа коаксиального шунта с параметрами: толщина резистивной трубки $\Delta = 1$ мм; активное сопротивление $R_{\text{ш}} = 750$ мкОм; индуктивность $L = 1$ нГн.

Рассмотрено влияние способа подключения потенциальных выводов коаксиального шунта на его динамические характеристики. Выявлено, что наиболее типичными являются следующие два способа подключения потенциальных выводов:

- 1) к внешней поверхности резистивного цилиндра (рисунок 2, выводы 1 и 1') и
- 2) к внутренней поверхности резистивного цилиндра (рисунок 2, выводы 2 и 2').

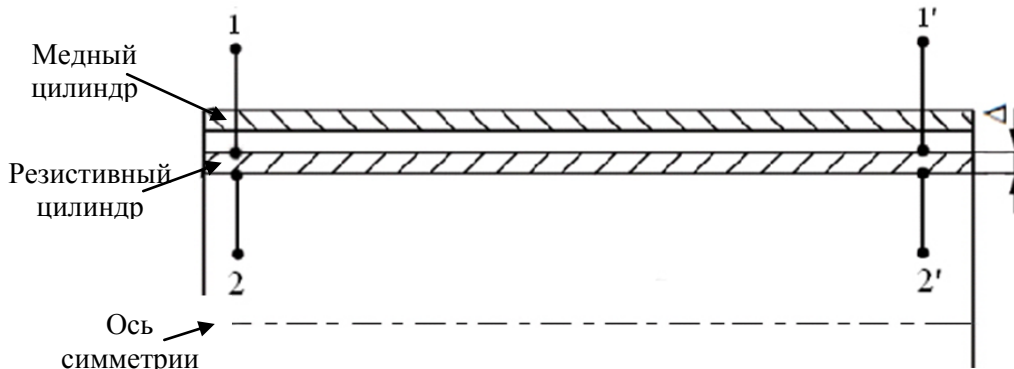


Рисунок 2 – Способы подключения потенциальных выводов

Полное сопротивление при *подключении потенциальных выводов к внешней поверхности резистивного цилиндра* определяется по известному выражению:

$$\dot{Z}_{(x=\Delta)} = R_{\text{ш}}(1 + j)m\Delta \text{cth}[(1 + j)m\Delta], \quad (3)$$

где m – величина, обратная эквивалентной глубине проникновения волны, м^{-1} ;
 Δ – толщина резистивного элемента шунта, м.

Из выражения (3) следует, что электрическая модель шунта представляет собой сложную неминимально фазовую цепь высокого порядка. Вид АЧХ шунта, построенной по выражению (3), приведен на рисунке 3 (кривая 1). Расчеты показывают, что, например, при полосе пропускания по уровню 3 дБ, равной 151 кГц, фазовый сдвиг на этой частоте будет составлять 36°. Чтобы аппроксимировать передаточную функцию шунта при данном подключении цепью первого порядка необходимо ограничить его полосу пропускания.

В результате разложения выражения (3) в ряд Тейлора получена формула:

$$\frac{\dot{Z}_{(x=\Delta)}}{R_{\text{ш}}} \approx 1 + j \frac{2m^2 \Delta^2}{3}, \quad (4)$$

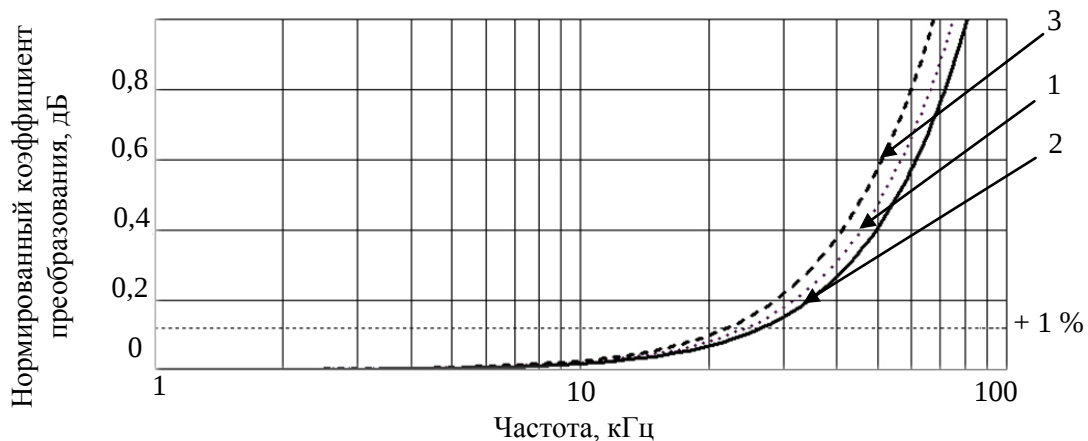
позволяющая интерпретировать составляющие комплексного коэффициента преобразования шунта следующим образом: первый член выражения (4) характеризует активную составляющую, второй член – реактивную составляющую шунта, вызванную его собственной индуктивностью L . По данному выражению построена АЧХ, приведенная на рисунке 3 (кривая 2).

Эта интерпретация подтверждается расчетами, которые следуют из известного решения уравнений Максвелла, описывающих электромагнитное поле шунта. Они позволяют найти зависимость верхней граничной частоты $f_{\text{в}}$ шунта от толщины стенки Δ при известных удельном сопротивлении ρ и магнитной проницаемости материала μ по формуле:

$$f_{\text{в}} = 0,35 \frac{0,1\pi^2 \rho}{\Delta^2 \mu}. \quad (5)$$

Тогда по выражению (1) с учетом формулы (5) можно построить АЧХ (рисунок 3, кривая 3), параметры которой весьма близки к кривым 1 и 2. Заметим, что разница между АЧХ, характеризующейся полным комплексным сопротивлением (кривая 1), и приближенными АЧХ (кривые 2 и 3) не превышает 1 %.

Из проведенного анализа следует, что передаточную функцию при данном способе подключения можно аппроксимировать звеном первого порядка при затухании на уровне 1 %. Для исследуемого способа подключения потенциальных выводов шунта при установленном уровне затухания верхняя граничная частота составила 25 кГц.



кривая 1, построенная по выражению (3), кривая 2 – по выражению (4),
кривая 3 – по выражению (5)

Рисунок 3 – АЧХ шунта

Полное сопротивление шунта при *подключении потенциальных выводов к внутренней поверхности резистивной трубки* в отличие от выражения (3) принимает вид:

$$\dot{Z}_{(x=0)} = \frac{R_{\text{ш}}(1+j)m\Delta}{\text{sh}[(1+j)m\Delta]}. \quad (6)$$

Разлагая выражение (6) в ряд Тейлора, получаем:

$$\frac{\dot{Z}_{(x=0)}}{R_{\text{ш}}} \approx 1 - j \frac{m^2 \Delta^2}{3} - \frac{7m^4 \Delta^4}{90} - \dots \quad (7)$$

Второй член выражения (7) характеризует реактивную составляющую шунта, вызванную его собственной индуктивностью L , а третий – описывает изменение ΔR активного сопротивления от частоты вследствие скин-эффекта. В рассматриваемом способе подключения составляющей ΔR пренебречь нельзя, т.к. ее вклад в полное сопротивление составляет не менее 23 % от вклада второй составляющей. Установлено, что комплексный коэффициент преобразования шунта с повышением частоты убывает (рисунок 4, кривая 1) из-за влияния третьего члена ряда (7).

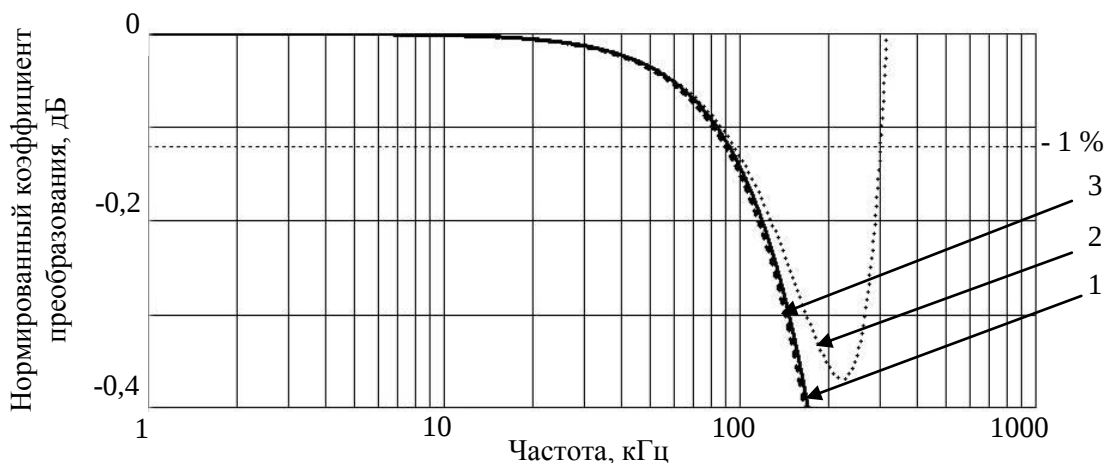
В ходе проведенных исследований определено, что при затухании на уровне 1 % передаточную функцию можно описать выражением:

$$\dot{Z}_{(x=0)} = \frac{R_{\text{ш}}}{(1 + j2\pi f \tau_{\text{ш}})}, \quad (8)$$

где f – частота, Гц;

$\tau_{\text{ш}}$ – постоянная времени шунта (для рассматриваемой конструкции равняется 0,3 мкс).

На основании выражений (6), (7) и (8) для исследуемой конструкции шунта построены его АЧХ (рисунок 4), по которым видно, что упрощенная формула (7) и выражение (8) аппроксимируют выражение (6) звеном первого порядка при этом отклонение между ними не превышает 1 %.



кривая 1, построенная по выражению (8), кривая 2 – по выражению (9),
кривая 3 – по выражению (10)

Рисунок 4 – АЧХ шунта

При подключении потенциальных выводов к внутренней поверхности резистивной трубки верхняя граничная частота составила 80 кГц при затухании на уровне 1 %, т.е. в 3,2 раза превысила верхнюю граничную частоту шунта при

подключении потенциальных выводов к внешней поверхности резистивной трубки.

Таким образом, выбор подходящего подключения потенциальных выводов шунта позволяет значительно расширить его частотный диапазон.

Другой возможностью улучшения динамических характеристик шунта в виде расширения полосы пропускания на заданном уровне ослабления АЧХ является использование так называемого **линейного амплитудного корректора (АК)**, который в определенной мере компенсирует нежелательный спад АЧХ. АК представляет собой дополнительный пассивный или активный узел, подключаемый к выходу шунта, и реализующий один из структурных методов коррекции погрешности.

В работе рассмотрена известная схема АК, предложенная К. Джонсоном и П. Палмером, которая имеет комплексный коэффициент передачи в виде дробно-рациональной функции с одним нулем и одним полюсом, что не позволяет полностью скорректировать АЧХ шунта с использованием единственного АК.

Автором предложена другая схема АК (рисунок 5), которая имеет комплексный коэффициент передачи с одним нулем.

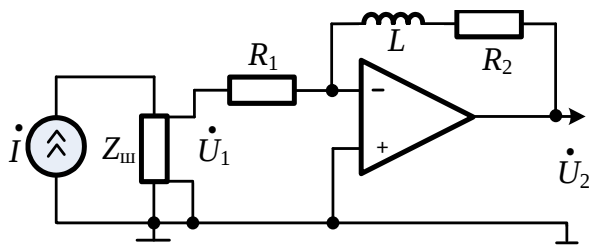
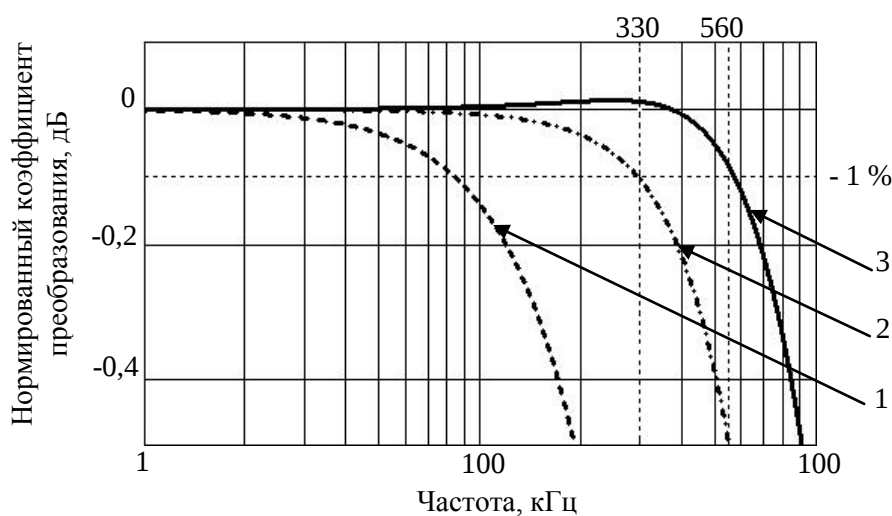


Рисунок 5 – Предложенная схема АК

Расширение АЧХ шунта в предложенном решении достигается при равенстве постоянных времени шунта и корректирующей цепи, а неравномерность АЧХ смещается в область более высоких частот за счет влияния высокочастотных нулей и полюсов характеристики шунта.

Предложенная схема была реализована в виде узла АК на базе операционного усилителя ОР37 (фирма Analog Devices) со следующими параметрами элементов: $R_1 = 560 \text{ Ом}$, $R_2 = 1330 \text{ Ом}$, $L = 3,9 \cdot 10^{-4} \text{ Гн}$.



1 – шунт; 2 – известная схема АК;
3 – предложенная схема АК

Рисунок 6 – АЧХ шунта без компенсации и с компенсацией

На рисунке 6 приведены расчетные АЧХ шунта без компенсации (кривая 1), с компенсацией по известной схеме (кривая 2) и с компенсацией по предложенной схеме (кривая 3).

Из графиков видно, что

- применение АК, состоящих из звеньев первого порядка, позволяет

уменьшить частотную погрешность (увеличить частотный диапазон шунта) не менее, чем в три раза по сравнению с шунтом без компенсации;

• предложенная схема АК обеспечивает верхнюю граничную частоту до 560 кГц с затуханием на уровне 1 %, а известная схема позволяет расширить частотный диапазон исследуемой конструкции шунта до 330 кГц. То есть предложенное в работе решение обеспечивает выигрыш по частоте почти в два раза.

В третьей главе «Разработка программного обеспечения для расчета параметров шунтов» приведена методика определения геометрических и электрических параметров безындуктивных токовых шунтов, включая динамические характеристики, положенная в основу разработанного инженерного калькулятора, учитывающего тепловые свойства и конструктивные особенности шунтов.

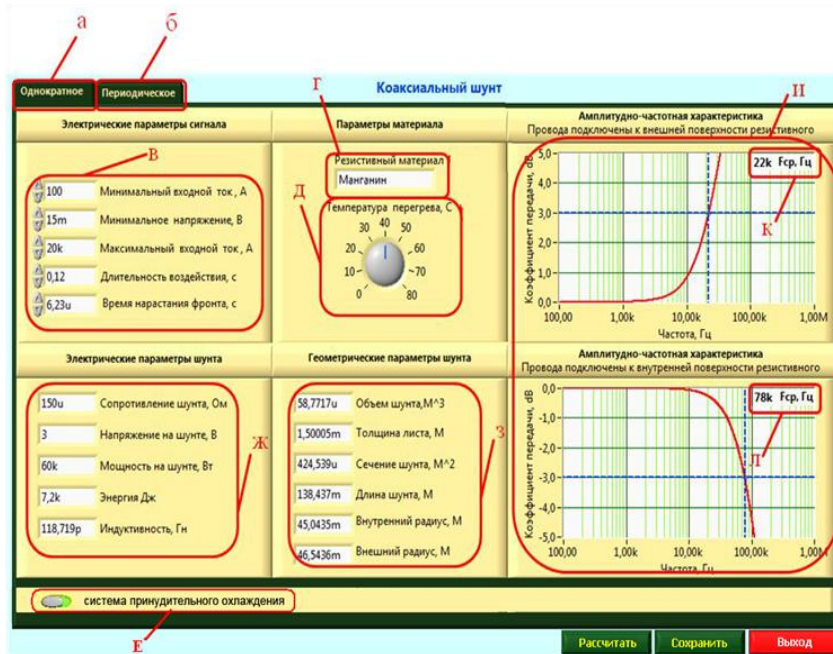


Рисунок 7 – Лицевая панель калькулятора при расчете параметров коаксиального шунта

Рисунке 7 – Лицевая панель калькулятора при расчете параметров коаксиального шунта

При выборе, например, варианта расчета параметров для коаксиального шунта в окне (в) необходимо задать электрические параметры измеряемого сигнала: максимальное и минимальное значение амплитуды измеряемого тока, длительность импульса и его фронта, минимальное напряжение, длительность воздействия. Затем необходимо выбрать материал – манганин или нихром из выпадающего меню «Резистивный материал» (г), задать температуру перегрева относительно температуры окружающей среды 20 °С (д) и нажать кнопку «Расчитать».



Рисунок 8 – Разработанный прототип коаксиального шунта на 1 кА

В соответствующие окна будут выведены рассчитанные параметры: электрические (ж) и геометрические параметры шунта (з); АЧХ шунта (и) при различных способах подключения потенциальных проводов к поверхности резистивного элемента. Разработанный калькулятор позволил выбрать и рассчитать требуемые параметры и по ним изготовить прототип коаксиального шунта, приведенный на рисунке 8, который имеет следующие характеристики: номи-

нальный ток – 1 кА, сопротивление – 750 мкОм, длина резистивного элемента – 90 мм, внутренний радиус резистивного элемента – 9 мм, зазор между цилиндрами – 1 мм, толщина резистивного элемента – 1 мм, полоса пропускания – 80 кГц (по уровню минус 3 дБ – 560 кГц).

В четвертой главе «Экспериментальные исследования динамических характеристик шунтов переменного тока» предложены и апробированы методы экспериментального определения коэффициента преобразования шунта:

- на основе нулевого метода, адаптированного для измерения малых сопротивлений, и
- на основе импульсного метода с использованием совместной цифровой обработки входного короткого импульсного воздействия на шунт и отклика на него.

Коэффициент преобразования шунта с помощью нулевого метода определяется следующим образом (рисунок 9). Сначала проводится калибровка измерительных каналов, в результате которой минимизируется их погрешность и формируются амплитуда и частота выходного сигнала калибратора тока. Сигнал с выхода калибратора тока подается на трансформатор тока и шунт. Выходные напряжения с трансформатора тока $U_{тр}$ и шунта $U_{ш}$ через реле поступают на сумматор и вычитатель. Полученные сигналы перемножаются и усиливаются. Затем с помощью фильтра нижних частот (ФНЧ) выделяется постоянная составляющая измеряемого сигнала ΔU , которая в дальнейшем оцифровывается аналого-цифровым преобразователем (АЦП) и через интерфейс передается в компьютер, который вычисляет разность квадратов $\Delta U = U_{ш}^2 - U_{тр}^2$.

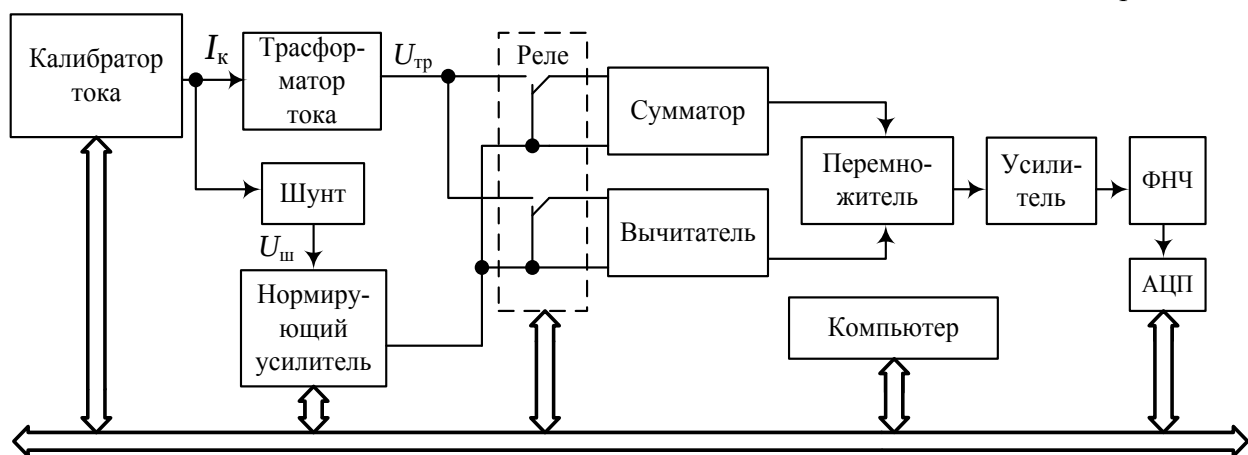


Рисунок 9 – Схема устройства на основе нулевого метода

В процессе измерения необходимо добиться выполнения условия $\Delta U \approx 0$ путем изменения коэффициента усиления нормирующего усилителя. После выполнения условия в компьютере рассчитывается коэффициент преобразования шунта по формуле:

$$Z_{ш} = \frac{K_T + \Delta U / I_k}{K_y}, \quad (9)$$

где I_k – ток с выхода калибратора тока, А;
 K_T – коэффициент преобразования трансформатора тока;
 K_y – коэффициент усиления нормирующего усилителя.

Предложенный метод защищен патентом на полезную модель РФ 139577 и позволяет повысить точность измерений малых значений сопротивлений.

Апробация предложенного метода проводилась при определении коэффициента преобразования разработанного прототипа коаксиального шунта. В качестве калибратора тока использован многофункциональный калибратор тока Fluke 5520A (США), а в качестве трансформатора тока – Lilco 13W0100 (Великобритания).

Экспериментальные исследования проводились при фиксированном токе 0,1 А на частотах, обеспечиваемых калибратором Fluke 5520A в диапазоне от 1 до 30 кГц. Относительная погрешность измерения коэффициента преобразования шунта при различных значениях частоты не превышала 0,2 %. Следует отметить, что предложенный подход позволяет определять коэффициент преобразования коаксиального шунта в полосе частот, ограниченной частотным диапазоном используемого калибратора тока.

В работе разработан альтернативный метод, позволяющий экспериментально определять частотные характеристики шунта переменного тока, основанный на совместной цифровой обработке входного короткого импульсного воздействия и отклика на него.

В разработанном методе на входах эталонного трансформатора тока и исследуемого шунта формируется короткий импульс тока, а выходные напряжения с них фиксируются с помощью двухканального цифрового осциллографа (рисунок 10).

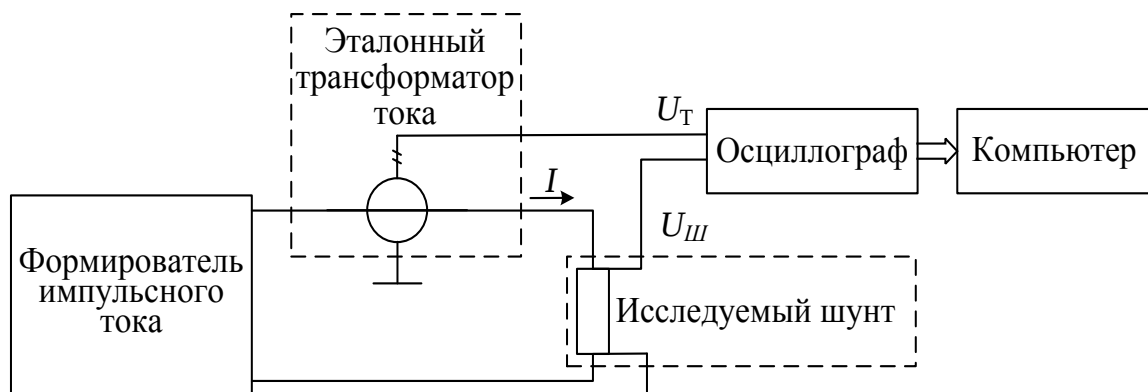


Рисунок 10 – Схема устройства на основе импульсного метода

С целью минимизации случайной погрешности формирование импульса и последующая его запись осуществляются многократно. Комплексный коэффициент преобразования $\bar{Z}(f_k)$ шунта вычисляется как отношение усредненных спектральных компонент входных $\bar{X}(f_k)$ и выходных $\bar{Y}(f_k)$ сигналов по выражению:

$$\bar{Z}(f_k) = \bar{Y}(f_k) / \bar{X}(f_k). \quad (10)$$

Модуль комплексного коэффициента преобразования (10) представляет собой амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) шунта, а его аргумент – фазочастотную характеристику (ФЧХ).

На основе предложенного метода разработан алгоритм цифровой обработки импульсных сигналов, получаемых при экспериментальном исследовании шунта и позволяющий определить его динамические характеристики. Алгоритм

был реализован в системе MATLAB, позволяющей осуществлять векторную обработку табличных данных и операции с вещественными числами разрядности 64. В ходе измерений запись данных осциллографом велась для N испытательных сигналов (импульсов), каждый из которых преобразовывался в цифровой формат и сохранялся в файлах с именами $\text{Trans}\langle i \rangle.\text{txt}$, хранящих измеренные данные с трансформатора тока, и $\text{Shunt}\langle i \rangle.\text{txt}$, хранящих измеренные данные с исследуемого шунта, где i – номер испытательного сигнала, $i = 1, \dots, N$. Каждый файл хранит двумерный массив данных, состоящий из 10000 строк. Каждая строка состоит из двух элементов в следующем формате: <время, мс; напряжение, В>. В алгоритме использована последовательная загрузка каждого файла данных. Далее данные подвергались быстрому преобразованию Фурье, умножались на весовой коэффициент усреднения и суммировались с результирующими данными для дальнейших вычислений.

Для экспериментальной проверки работоспособности предложенного метода были проведены измерения динамических характеристик классической интегрирующей RC-цепи. Получена относительная погрешность измерения коэффициента передачи цепи менее 2 %.

С помощью разработанного метода были проведены измерения динамических характеристик разработанного прототипа шунта. На рисунке 11 приведены АЧХ и ФЧХ шунта, полученные по расчетным (кривые 1) и экспериментальным (кривые 2) с использованием предложенного метода данным.

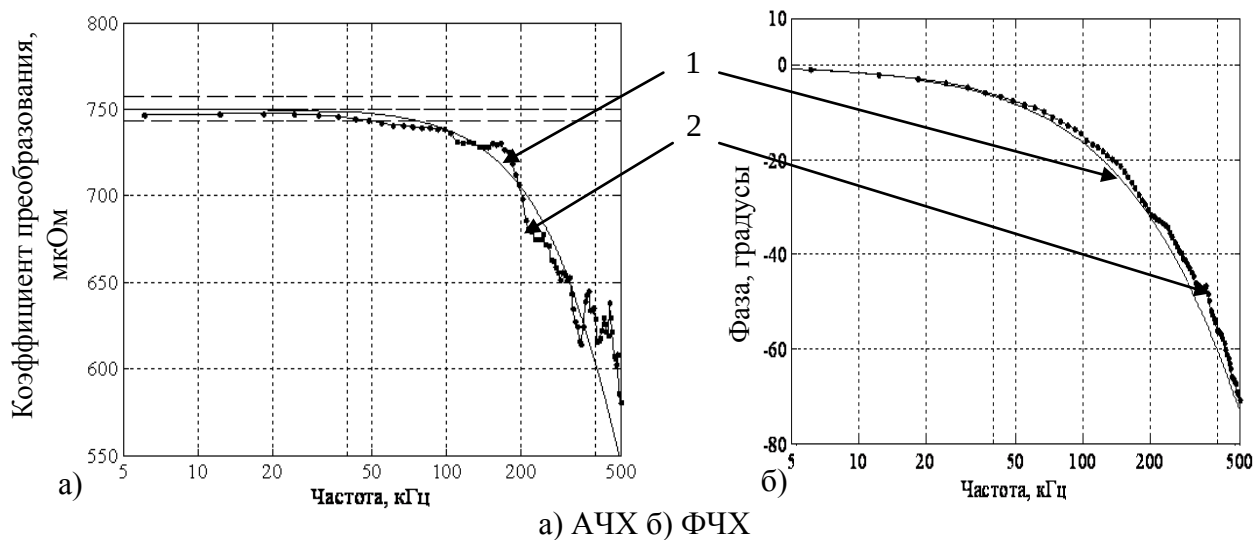


Рисунок 11 – Динамические характеристики шунта

Из рисунка видно, что при затухании на уровне 1 % измеренная верхняя граничная частота составила 80 кГц, а фазовый сдвиг на этой частоте – минус 12°, что хорошо согласуется с расчетными значениями. Получена относительная погрешность измерения коэффициента преобразования шунта менее 1 %.

Аналогичные измерения были проведены для разработанного прототипа коаксиального шунта со схемой амплитудной коррекции, описанной в главе 2. На рисунке 12 приведены соответствующие расчетные (кривые 1) и экспериментальные (кривые 2) АЧХ и ФЧХ. Получено значительное совпадение теоретических и экспериментальных частотных характеристик скорректированного шунта. При затухании на уровне 1 % экспериментальная верхняя граничная частота составила 555 кГц, а теоретическая – 560 кГц. Относительная погреш-

ность коэффициента преобразования скорректированного шунта составила менее 2 %.

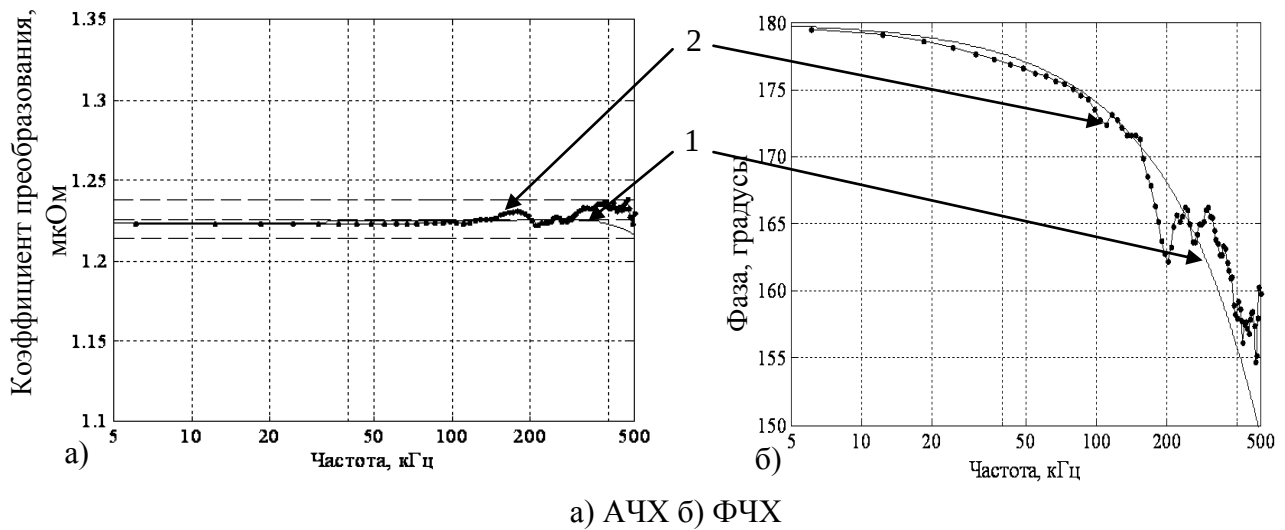


Рисунок 12 – Динамические характеристики скорректированного шунта

В приложениях диссертации приведены акты внедрения результатов диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Предложен метод расширения частотного диапазона коаксиального шунта с использованием амплитудных корректоров первого порядка на основе активной RL -цепи, позволяющей увеличить верхнюю граничную частоту не менее, чем в три раза при затухании коэффициента преобразования шунта не более 1 %.
2. Разработана и программно реализована методика определения геометрических и электрических параметров безындуктивных токовых шунтов, включая динамические характеристики, учитывающая тепловые свойства и конструктивные особенности шунтов.
3. Разработано и апробировано устройство для измерения комплексного коэффициента преобразования, основанное на нулевом методе, позволяющее экспериментально исследовать характеристики низкоомных шунтов переменного тока в частотном диапазоне, ограниченном возможностями многозначной меры. Относительная погрешность измерения коэффициента преобразования шунта составила менее 0,2 %.
4. Разработан и апробирован метод экспериментального определения амплитудно- и фазочастотных характеристик токового шунта, основанный на совместной цифровой обработке входного короткого импульсного воздействия и отклика на него, позволяющий определять верхнюю граничную частоту коэффициента передачи шунта с помощью компонентов комплексных спектральных преобразований напряжений с выходов шунта и эталонного преобразователя тока. Относительная погрешность измерения коэффициента преобразования шунта составила менее 2 %.
5. Разработан прототип коаксиального шунта, имеющий коэффициент преобра-

зования 750 мкОм и полосу пропускания 560 кГц. Разработанный коаксиальный шунт используется в ОАО "Новосибирский завод химконцентратов" (ОАО НЗХК) для регистрации амплитудных и временных параметров тока источников питания контактной сварки.

6. Результаты диссертационной работы использованы при выполнении трех НИР, выполненных по грантам РФФИ и Федеральным целевым программам «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» и «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России».

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК

1. **Бедарева Е.В.** Импульсный метод определения частотных характеристик сильноточных шунтов / А.И. Заревич, С.В. Муравьев, Е.В. Бедарева, С.Р. Карпенко // Известия Томского политехнического университета – 2012. – Т. 321. – № 4 (Энергетика). – С. 137-140
2. **Бедарева Е.В.** Цифровая обработка импульсных сигналов для определения частотных характеристик преобразователей тока / А.И. Заревич, С.В. Муравьев, Е.В. Бедарева, О.Н. Величко // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 5 (Управление, вычислительная техника и информатика). – С. 116-120.
3. **Бедарева Е.В.** Влияние способов подключения потенциальных выводов на динамические характеристики коаксиальных шунтов / Е.В. Бедарева, Э.И. Цимбалист, С.В. Муравьев, П.Ф. Баранов // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – №. 4 (Энергетика). – С. 159-164.
4. **Бедарева Е.В.** Аппаратно-программный комплекс для автоматизированных испытаний сильноточных преобразователей / А.И. Заревич, С.В. Муравьев, Е.В. Бедарева, П.Ф. Баранов, С.В. Сарычев // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 4 (Энергетика). – С. 180-184.
5. **Бедарева Е.В.** Исследование температурного поля коаксиального шунта в программном комплексе ANSYS / Е.В. Бедарева, Е.В. Костин // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 5 (Управление, вычислительная техника и информатика). – С. 72-75.
6. **Бедарева Е.В.** Расширение амплитудно-частотных характеристик коаксиальных шунтов / Е.В. Бедарева, Э.И. Цимбалист, П.Ф. Баранов, А.А. Левицкий // Измерительная техника. – 2014. – № 7. – С. 56-61.

Патенты

7. **Патент на полезную модель 139577** Российская федерация, МПК G01R35/00. Устройство для поверки шунтов / Баранов П.Ф., Борицов В.Н., Бедарева Е.В., Цимбалист Э.И. / заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет (RU). – 2013138790/28; заявл. 20.08.2013; Опубл. 20.04.2014, Бюл. 11.

8. **Патент на изобретение 2528588** Российская федерация, МПК G01R35/00. Устройство для определения амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик токовых шунтов / Заревич А.И., Муравьев С.В., Бедарева Е.В. / заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет (RU). – 2013119851; заявл. 30.04.2013; Опубл. 20.09.2014, Бюл. 26.

Статьи в других изданиях

9. **Бедарева Е.В.** Исследование динамических характеристик коаксиального шунта // Современные техника и технологии: Труды XVII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Томск, 18-22 апреля 2011 г.), Томск: Изд. ТПУ, 2011. – С. 156-157.
10. **Бедарева Е.В.** Исследование распределения температурного поля коаксиального шунта методом конечных элементов / Е.В. Бедарева, Е.В. Костин // Молодежь и современные информационные технологии: IX Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием (Томск, 11-13 мая 2011 г.), Томск: Изд. ТПУ, 2011. – С. 280-281.
11. **Бедарева Е.В.** Расчет тепловых параметров коаксиальных шунтов // VIII научно-практическая конференция «Метрологическое обеспечение учета электрической энергии в Украине» (Киев, 01-02 ноября 2011 г.), Украина, Киев, 2011. – С. 68-72.
12. **Бедарева Е.В.** Аналитическое описание динамических характеристик коаксиальных шунтов // Современные техника и технологии: сборник трудов XIX международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Томск, 15-19 апреля 2013 г.), Томск: Изд. ТПУ, 2013. – Т. 1. – С. 127-128.
13. **Бедарева Е.В.** Автоматизированный расчет параметров плоских шунтов переменного тока / Е.В. Бедарева, П.Ф. Баранов, А.А. Левицкий // Вестник науки Сибири. – 2013. – № 4 (10). – С. 42-47.
14. **Bedareva E.** Digital Signal Processing in Pulse Method for Measuring Frequency Response Function of High-Current Shunt / A. Zarevich, S. Muravyov, E. Bedareva // 19th IMEKO TC4 Symposium "Advances in Instrumentation and Sensors Interoperability", July 18-19, 2013, Barcelona, Spain, pp. 496-500. (Scopus)
15. **Бедарева Е.В.** Моделирование стационарного магнитного поля коаксиального шунта в программном пакете ANSYS Workbench / Л.И. Худоногова, Е.В. Бедарева // Вестник науки Сибири. – 2014. – № 2 (12). – С. 53-59.
16. **Бедарева Е.В.** Исследование магнитного поля коаксиальных шунтов / Л.И. Худоногова, Е.В. Бедарева // Современные техника и технологии: сборник трудов XX международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Томск, 14-18 апреля 2014 г.), Томск: Изд. ТПУ, 2014. – Т. 1. – С. 155-156.

Подписано к печати __.__.2014. Формат 60х84/18. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 1,0. Уч.-изд. л. 0,9.
Заказ . Тираж 100 экз.



Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2008

ИЗДАТЕЛЬСТВО  **ТПУ**. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.