

Наталинова Наталья Михайловна

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗИСТИВНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ
ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ ТОКОВ СЛОЖНОЙ
ФОРМЫ В СОСТАВЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

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

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2009

Работа выполнена на кафедре "Компьютерные измерительные системы и метрология" Томского политехнического университета.

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
Муравьев Сергей Васильевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
Гольдштейн Александр Ефремович
кандидат технических наук, доцент
Свинолулов Юрий Григорьевич

Ведущая организация:

**Институт проблем управления РАН,
г. Москва**

Защита состоится **22 декабря 2009 г. в 15 часов** на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.09 при Томском политехническом университете по адресу: г. Томск, пр. Ленина, 2, 10-й корпус ТПУ, ауд. 213.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета по адресу: г. Томск, ул. Белинского, 53.

Автореферат разослан **18 ноября 2009 г.**

Учёный секретарь совета Д 212.269.09

кандидат технических наук, доцент

Б.Б. Винокуров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В современных технологических процессах, таких как контактная сварка, электрохимическое напыление и др., используются источники импульсного тока сложной формы. Амплитудные и временные параметры, формируемые этими источниками импульсов, влияют на качество продукта технологического процесса, например, на количество дефектов и структуру сварного шва или толщину и шероховатость упрочняющего покрытия. Поэтому важно с достаточной для практики точностью измерять эти параметры для целенаправленного управления технологическим процессом и, следовательно, качеством конечного продукта.

Испытательные лаборатории силового оборудования электротехнического и электроэнергетического назначения разных стран, такие как CESI (Италия), ESEF (Франция), JSTC (Япония), КЕМА (Нидерланды), РЕНЛА (Германия) и др., используют прецизионные резистивные преобразователи больших токов для измерения кратковременных импульсов тока, возникающих в переходных режимах короткого замыкания во время испытаний таких электрических аппаратов, как мощные трансформаторы, силовых размыкателей, коммутаторов, защитных устройств, предохранителей и т.д. Типичными задачами в таких применениях являются широкополосные измерения больших как импульсных, так и кратковременных токов.

В решении перечисленных задач трудно найти альтернативу резистивным шунтам специальной безындуктивной конструкции, особенно при измерении больших токов (десятки и сотни килоампер) сложной формы, когда необходимо избавляться от вредного влияния реактивной составляющей полного сопротивления шунта.

Исследованиями, разработкой и применением современных безындуктивных шунтов метрологического и промышленного назначения занимаются ведущие национальные метрологические институты России (ВНИИМ им. Менделеева), США (Национальный институт стандартов и технологий), Канады (Институт национальных измерительных стандартов), Швеции (Шведский национальный институт испытаний и исследований), Великобритании (Национальная физическая лаборатория) и других стран.

Резистивные измерительные преобразователи тока в напряжение (шунты) начали активно применяться для измерения токов еще в начале XX века. Несмотря на это возможности дальнейших исследований, связанных с совершенствованием конструкции шунтов с целью расширения их частотного и динамического диапазонов, а также расчетом, моделированием и оцениванием их метрологических характеристик далеко не исчерпаны.

Тема диссертационной работы разрабатывалась в рамках одного из основных направлений научной деятельности Томского политехнического университета "Методы и технические средства измерения и контроля физических величин на основе новых эффектов и информационных технологий".

Целью диссертационной работы является разработка и исследование коаксиальных шунтов для прецизионных измерений формы больших импульсных токов, которые могут эксплуатироваться в составе технологических установок различного назначения в производственных условиях.

Поставленная цель определила следующие **основные задачи исследования**:

1. Анализ и выбор конструкции измерительного резистивного преобразователя тока в напряжение, обеспечивающей измерение формы тока с точностью не хуже 0,1 %.
2. Разработка и программная реализация алгоритма автоматизированного расчета механических и электрических параметров безындуктивных шунтов коаксиальной конструкции.
3. Разработка и исследование модели магнитных полей резистивных безындуктивных шунтов трубчатой и коаксиальной конструкций и расчет паразитной индуктивности на основе полученных распределений магнитного поля.
4. Разработка способа калибровки (поверки) шунтов на постоянном и переменном токах и апробация этого способа с помощью специально созданной автоматизированной системы для метрологических исследований шунтов.
5. Разработка методики расчета неопределенности активного сопротивления шунта в соответствии с международной рекомендацией – Руководством по выражению неопределенности измерения.
6. Применение результатов работы для создания компьютерной системы измерения формы сварочного тока в процессе контактной сварки.

Методы исследований. Теоретическая часть работы выполнена на основе методов теории электромагнетизма, теории погрешностей, математической статистики, математического моделирования, дифференциального и интегрального исчисления. При расчетах и моделировании использовался конечно-элементный программный пакет ANSYS. Экспериментальные исследования проводились в производственных и лабораторных условиях.

Достоверность полученных результатов диссертационной работы подтверждается совпадением с достаточной точностью расчетных данных и результатов моделирования и эксперимента.

Компьютерная система измерения больших токов, созданная на базе разработанного в ходе диссертационной работы резистивного преобразователя, зарегистрирована в Государственном реестре средств измерений (№ 28856-05), допущена к применению в Российской Федерации и используется в ОАО "Новосибирский завод химконцентратов" для контроля качества сварных соединений.

Научная новизна:

1. Разработана и исследована конечно-элементная модель электромагнитного поля коаксиального шунта, позволяющая минимизировать и количественно оценивать реактивную составляющую неопределенности коэффициента передачи шунта.
2. Предложена и программно реализована в графической среде LabVIEW методика автоматизированного инженерного расчета механических и электрических параметров шунтов коаксиальной конструкции.
3. Разработана и экспериментально проверена методика калибровки (поверки) шунтов на постоянном и переменном токах, основанная на коррекции мультипликативной составляющей неопределенности коэффициента передачи шунта с помощью обратного преобразования выходного сигнала измерительного канала (защищена патентом РФ № 80585).
4. Предложена методика расчета неопределенности коаксиального шунта, позволяющая оценивать его динамические характеристики с учетом значения паразитной индуктивности, полученного на основе данных конечно-элементного моделирования электромагнитного поля шунта.

Практическая ценность полученных в работе результатов заключается в том, что они будут полезны разработчикам систем контроля и измерения формы токов сложной формы в силовых установках различного назначения, например в электроэнергетике, в сварочной технике, в электрохимических технологиях и т.д., в конечном счете приводя к повышению эффективности и качества принимаемых проектных решений.

Результаты работы могут также способствовать созданию и совершенствованию методов и средств метрологического обеспечения систем измерений больших импульсных токов и могут использоваться при разработке методик выполнения измерений в испытательных лабораториях силового оборудования, а также в процедурах аккредитации и подтверждения компетенции этих лабораторий.

Реализация результатов работы. Результаты работы использованы при разработке компьютерной системы измерения больших токов, созданной в рамках выполнения хоздоговорной НИР (х/д № 1-27/04у от 16.02.2004 г.) для ОАО "Новосибирский завод химконцентратов" (г. Новосибирск). Система прошла процедуру утверждения типа, зарегистрирована в Государственном реестре средств измерений за № 28856-05 и допущена к применению в Российской Федерации.

Положения, выносимые на защиту:

1. Модель электромагнитного поля коаксиального шунта, полученная методом конечных элементов в пакете ANSYS, позволяет минимизировать и количественно оценивать паразитную индуктивность шунта, причем эта оценка и

границы неопределенности значения индуктивности могут быть использованы при расчете расширенной неопределенности шунта.

2. Методика автоматизированного инженерного расчета механических и электрических параметров шунтов коаксиальной конструкции программно реализована в графической среде LabVIEW.
3. Способ калибровки (поверки) шунтов на постоянном и переменном токах основана на коррекции мультипликативной составляющей неопределенности коэффициента преобразования шунта с помощью обратного преобразования выходного сигнала измерительного канала.
4. Процедура расчета неопределенности коаксиального шунта позволяет оценивать его динамические характеристики с учетом значения паразитной индуктивности, полученного на основе данных конечно-элементного моделирования электромагнитного поля шунта.

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

- Всероссийская научная конференция молодых ученых "Наука, технологии, инновации", г. Новосибирск, НГТУ, 2006 и 2008 гг. (доклады отмечены дипломами – III степени в 2006 г. и II степени в 2008 г.);
- XI и XII Международная научно-практическая конференция "Качество – стратегия XXI века", г. Томск, 2006 и 2007 гг. (диплом II степени в 2007 г.);
- XIII, XIV и XV Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Современная техника и технологии", г. Томск, ТПУ, 2007, 2008 и 2009 гг.
- VIII конференция пользователей CADFEM, г. Москва, 2008 г.
- Всероссийская конференция с международным участием "Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения" (УКИ'08), г. Москва, Институт проблем управления, 2008 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ, в том числе девять статей в трудах международных и всероссийских конференций, одна статья в зарубежном издании (импакт-фактор 0,493), включенном в систему цитирования Science Citation Index Expanded (база по естественным наукам), и один патент РФ.

Структура и объем диссертации Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 100 библиографических ссылок и двух приложений. Ее основной текст изложен на 140 страницах, содержит 6 таблиц и 55 рисунков.

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 "Резистивные преобразователи для измерения импульсных токов" проведен обзор как отечественных, так и зарубежных работ, посвященных измерительным преобразователям, используемым для измерения больших токов. Сделан сравнительный анализ основных типов датчиков для измерения постоянного и переменного тока: трансформаторов тока (и их разновидности – катушки Роговского), принцип действия которых основан на законе электромагнитной индукции; датчиков на основе эффекта Холла; магнитооптических датчиков (эффект Фарадея) и резистивных датчиков (закон Ома). Из результатов анализа следует, что наиболее предпочтительным для измерения импульсов больших токов с точки зрения наиболее полного удовлетворения шести основных требований (частотный и динамический диапазоны, точность, помехоустойчивость, возможность измерения постоянной составляющей и стоимость) является безындуктивный (коаксиальный) трубчатый шунт (рис.1).

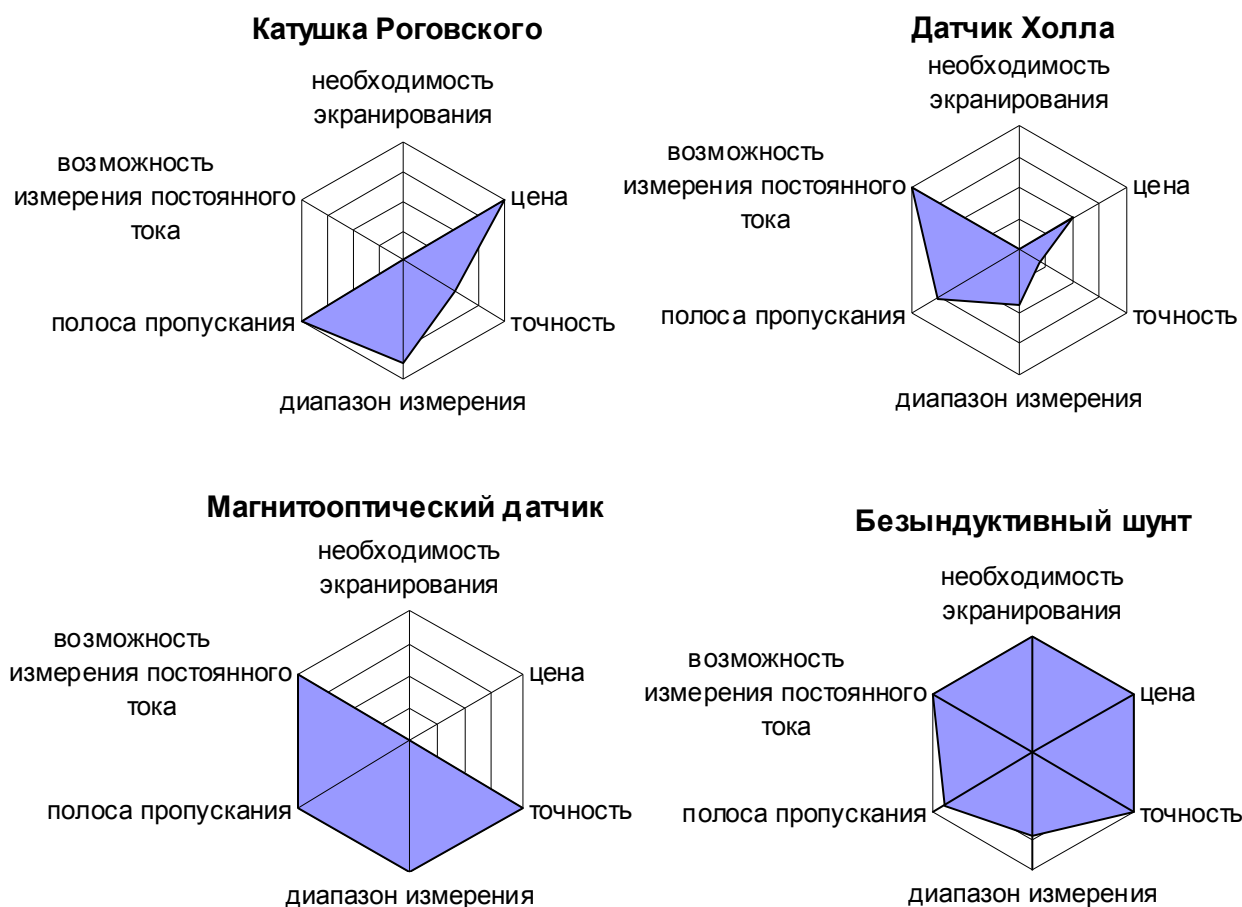


Рис. 1. Лепестковые диаграммы характеристик датчиков тока

Коаксиальный шунт – это резистор, имеющий малое омическое сопротивление, который включается последовательно в измеряемую цепь и практически

не оказывает влияния на форму измеряемого тока. Изучением проблем измерения больших токов с помощью шунтов занимались как отечественные: Болотин И.Б., Эйдель Л.З., Векслер М.С., Теплинский А.М., Шапиро Е.З., – так и зарубежные ученые: Silsbee F.B., Souders T.M., Johnson C.M., Malewski R., Filipski P.S. и др. В работах этих и других специалистов показано, что **зависимость напряжения на шунте от измеряемого тока линейна**.

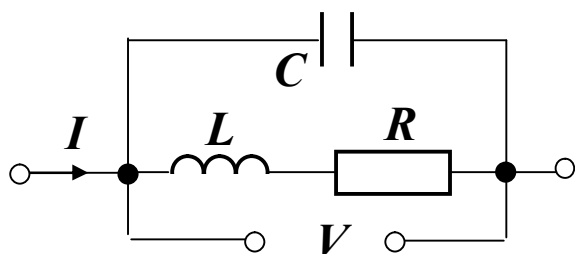


Рис. 2. Упрощенная эквивалентная схема токового шунта

Общепринятая эквивалентная схема шунта показана на рис. 2, где R , L и C активное сопротивление, паразитные индуктивность и емкость соответственно. Полное сопротивление такой цепи можно записать в виде:

$$Z = R \left[1 + j\omega \left(\frac{L}{R} - RC \right) \right]. \quad (1)$$

Величину, стоящую в круглых скобках и имеющую размерность времени, называют постоянной времени τ , которая представляет собой сдвиг по времени между выходным напряжением шунта V и входным током I . Так как типичное значение R менее 0,1 Ом, **влияние паразитной емкости пренебрежимо мало вплоть до высоких частот**. Выходное напряжение, таким образом, имеет вид:

$$V(t) = I(t)R + L \frac{dI(t)}{dt}. \quad (2)$$

То, насколько мала может быть паразитная индуктивность, определяет верхнюю границу частотного диапазона. Если шунт безындуктивный, существенным фактором, ограничивающим частотный диапазон, становится **не паразитная индуктивность**, а поверхностный (скин-) эффект. В этом случае передаточная характеристика для скачка тока амплитудой I_0 имеет вид:

$$V(t) \approx I_0 R_0 (1 - e^{-6t/\mu\sigma\Delta^2}) \quad (3)$$

где $I_0 R_0$ – напряжение на выходе "идеального" шунта, Δ – толщина стенки шунта, σ – электрическая проводимость токовой цепи, μ – магнитная проницаемость резистивного материала.

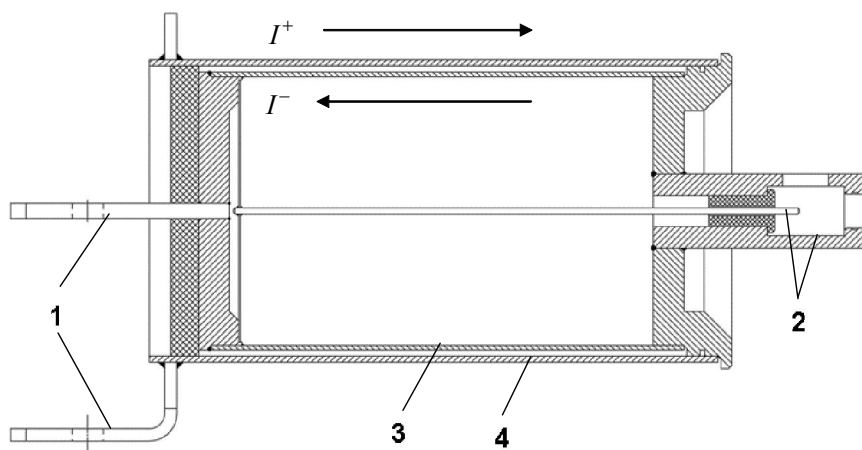


Рис. 3. Конструкция коаксиального шунта

На рис. 3 изображена конструкция коаксиального шунта, состоящая из двух трубок, по которым протекает ток в противоположных направлениях, где 1 – токовые выводы; 2 – потенциальные выводы; 3 – цилиндр из манганина; 4 – медный цилиндр.

Процедура расчета шунтов, которая следует из работ упомянутых выше авторов и основана на выражениях (2) и (3), позволяет определить конструктивные и электрические параметры шунтов для заданных параметров импульсов измеряемых больших токов. Однако до сих пор эта процедура не была автоматизирована.

Во второй главе "Моделирование магнитного поля и расчет параметров коаксиального шунта" описана процедура автоматизированного расчета механических и электрических параметров коаксиального шунта для измерения импульсных токов и ее программная реализация в графической среде LabVIEW.

Измеряемый импульс тока

Максимальная амплитуда, А	Минимальная амплитуда, А	Длительность, с	Длительность фронта, мкс	Минимальное входное напряжение осциллографа, мВ
20000,00	100,00	0,12	6,23	15,00

Температура перегрева, в градусах

15 20 25 30 35 40 5 0 10

Конструкция токовой цепи шунта

Объем, куб.см	Длина, мм	Сечение, кв.мм
54,76	133,63	409,81

Электрические параметры шунта

Сопротивление шунта, МОм	Напряжение на шунте при максимальном токе, мВ
150,00m	3000,00
Максимальная мощность, Вт	Энергия, выделяющаяся на шунте, Дж
60,00k	7200,00
Индуктивность, нГн	
1,16	

Конструкция шунта

Толщина цилиндров, мм	Длина шунта, мм
1,50	273,16
Внутренний радиус цилиндра, мм	Толщина диэлектрика м/д цилиндрами, мм
43,47	2,00

Пуск

Рис. 4. Лицевая панель программы расчета параметров коаксиального шунта

Лицевая панель программы расчета параметров коаксиального шунта приведена на рис. 4. На лицевой панели программы задаются (и исходными данными для расчетов являются) следующие параметры шунта: максимальная

минимальная амплитуда измеряемого импульса тока, А; длительность импульса, с; длительность фронта импульса, мкс; минимальное входное напряжение осциллографа, мВ; температура перегрева, °С; толщина диэлектрика между двумя цилиндрами.

В соответствующие окна лицевой панели *выводятся* следующие результаты расчета: электрические параметры шунта (сопротивление, мОм; напряжение на шунте при максимальном токе, мВ; максимальная мощность, Вт; энергия, выделяющаяся на шунте, Дж; индуктивность шунта, нГн); параметры конструкции токовой цепи шунта (объем манганинового цилиндра, см³; длина манганинового цилиндра, мм; сечение манганинового цилиндра, мм²) и параметры конструкции шунта (толщина цилиндров, мм; длина шунта, мм; внутренний радиус резистивной трубки, мм).

Разработанная программа-калькулятор была использована для расчета параметров коаксиального шунта для измерения импульсного тока максимальной амплитудой $I_{max} = 20$ кА, длительностью импульса $t = 0,12$ с. Эти и рассчитанные значения показаны в соответствующих окнах лицевой панели калькулятора на рис. 4.

Исходя из того, что наибольший вклад в погрешность низкоомных широкополосных шунтов переменного тока вносит паразитная индуктивность, которая возникает вследствие значительной величины собственного внешнего магнитного поля, в этой главе приводятся результаты моделирования этого поля для трубчатых шунтов унифилярной и бифилярной конструкции. Для построения модели использовался метод конечных элементов и программный комплекс ANSYS 12.0.

Были разработаны две модели: одна – для шунта унифилярной, вторая – для шунта бифилярной трубчатой конструкции. Модель унифилярного шунта позволяет продемонстрировать эффект бифилирования (использования двух резистивных трубок вместо одной, по которым ток течет в противоположных направлениях).

Расчет магнитных полей в пакете ANSYS основывается на системе уравнений Максвелла, которые в интегральной форме имеют вид:

$$\oint \vec{E} dl = - \int \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} dS, \oint \vec{D} dS = \int \rho dV, \oint \vec{H} dl = \int (j + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}) dS, \oint \vec{B} dS = 0 \quad (4)$$

где $\vec{H}$ – вектор магнитного поля, $\vec{B}$ – вектор индукции магнитного поля, $\vec{D}$ – вектор тока смещения, ρ – объемная плотность сторонних зарядов, j – плотность тока проводимости, S – площадь поверхности, l – расстояние.

В системе ANSYS учитывается также так называемое материальное уравнение, описывающее свойства среды, которое имеет следующий вид:

$$\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}, \quad (5)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, μ – магнитная проницаемость материала (воздуха, меди или манганина).

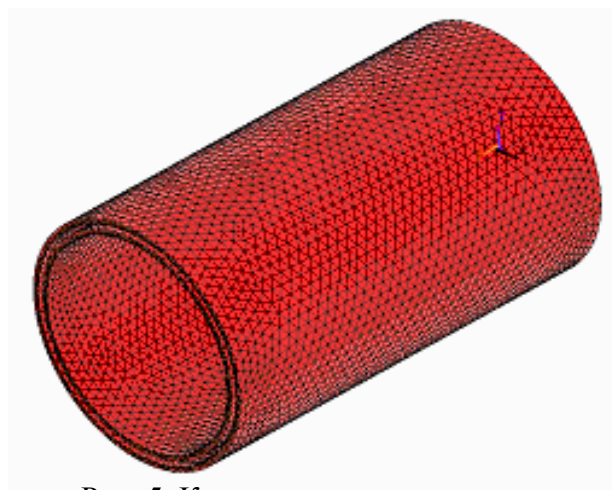


Рис. 5. Конечно-элементная сетка модели коаксиального шунта

При моделировании было принято следующее допущение: протекающий ток распределен равномерно по сечению проводника, т.е. поверхностный эффект не учитывается.

Конечные элементы представляли собой четырехугольник произвольной формы, что рекомендуется для расчета магнитных систем на плоскости. Представление о геометрии моделей и количестве конечных элементов дает рис. 5. Геометрические параметры моделей соответствуют расчетным данным, показанным на рис. 4.

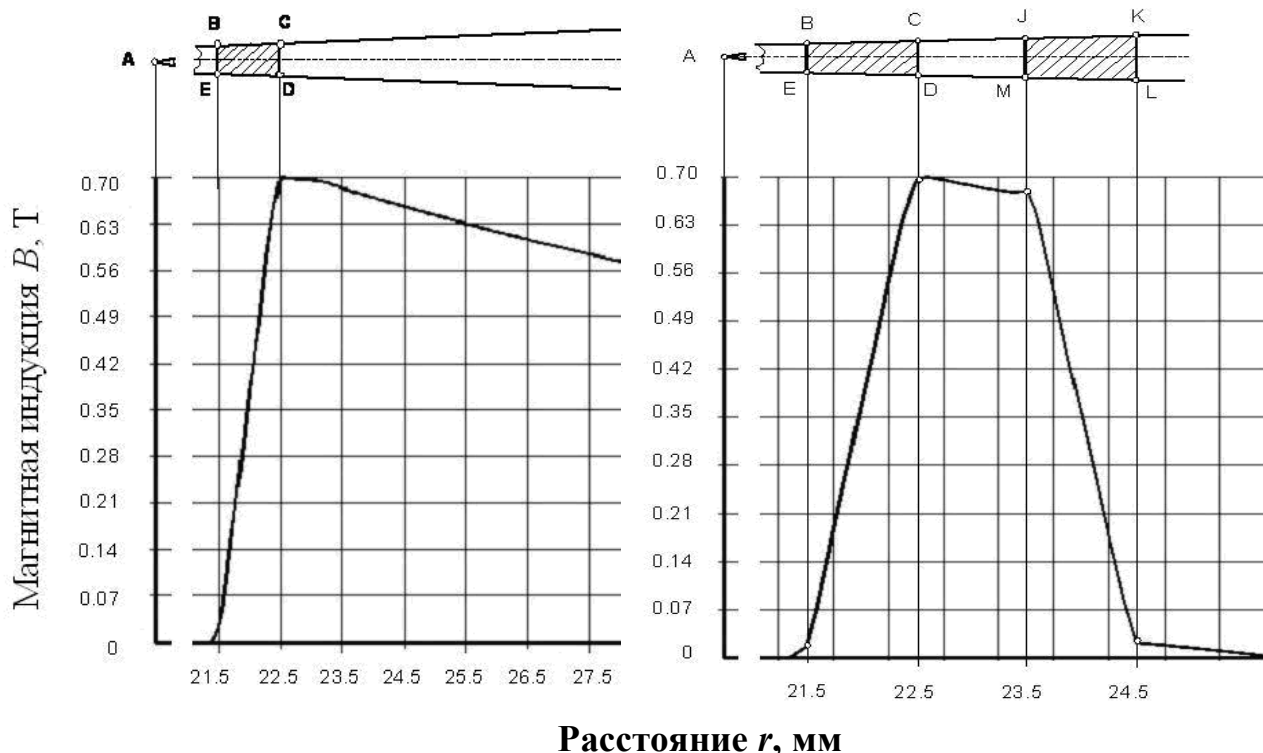


Рис. 6. Кривые распределения магнитной индукции трубчатого (слева) и коаксиального шунтов

Магнитное поле в коаксиальном шунте сосредоточено в зазоре между цилиндрами. Внутри и снаружи цилиндров, образующих резистивную часть коаксиального шунта, поле, создаваемое протекающим током, отсутствует. В случае с простым трубчатым шунтом, внутри цилиндра магнитное поле также отсутствует, однако, снаружи оно распространяется далеко за пределы проводника.

Известно, что расчет индуктивности, как параметра электромагнитного поля, исходя из уравнений Максвелла, представляет определенные вычислительные трудности. Обычно для расчета индуктивности коаксиального шунта используется приближенная формула:

$$L = 2 \cdot 10^{-7} \cdot l \cdot \ln \frac{2r_3}{2r_2}, \quad (6)$$

где l – длина шунта, r_3 – внешний радиус внутреннего цилиндра, r_2 – внутренний радиус внешнего цилиндра.

Расчет индуктивности по формуле (6) при геометрических размерах шунта, приведенных на рис. 4, дает значение $L = 1,12 \cdot 10^{-9}$ Гн.

Однако данные моделирования магнитного поля также позволяют оценить индуктивность шунта. Действительно, связь между индуктивностью L и магнитной индукцией B , являющейся функцией расстояния r , описывается выражением:

$$L = \frac{2\pi}{I^2} \int (B^2 r) dr, \quad (7)$$

Чтобы воспользоваться формулой (7), определим зависимость $B(r)$ по графику, полученному в результате моделирования (рис. 6). Из графика видно, что зависимость $B(r)$ можно представить суммой трех функций $B_i(r)$, $i = 1, 2, 3$. Тогда выражение (7) принимает вид:

$$L = \frac{2\pi}{I^2} \left(\int_{0,0215}^{0,0225} (B_1 r) dr + \int_{0,0225}^{0,0235} (B_2 r) dr + \int_{0,0235}^{0,0245} (B_3 r) dr \right), \quad (8)$$

Для вычисления интегралов в выражении (8) определим зависимости $B_i(r)$. Из рис. 6 видно, что все три функции являются практически линейными и могут быть аппроксимированы уравнениями прямых. Эти уравнения имеют следующий вид:

$$B_1 = 700r - 1505, \quad B_2 = -20r + 1150, \quad B_3 = -680r + 1665. \quad (9)$$

Выражение (8) с учетом выражения (9) принимает следующий вид:

$$L_m = \frac{2\pi}{I^2} \left[\left(233,3r^3 - 752,5r^2 \right) \Big|_{0,0215}^{0,0225} + \left(-6,67r^3 + 552,5r^2 \right) \Big|_{0,0225}^{0,0235} + \left(-226,67r^3 + 833r^2 \right) \Big|_{0,0235}^{0,0245} \right] \quad (10)$$

Расчет по формуле (10) дает значение индуктивности $L_m = 1,57 \cdot 10^{-9}$ Гн. Отличие этого значения от полученного по формуле (6) составляет 40%.

В третьей главе "Исследование метрологических характеристик шунтов переменного тока" после краткого описания методов поверки (калибровки) шунтов предлагается новый метод, который позволяет производить поверку шунтов методом вольтметра-амперметра с коррекцией погрешностей измерительных каналов по току и напряжению на основе обратного преобразования. В ходе поверки требуется определить значение его сопротивления на постоянном токе, чтобы оценить его отклонение от номинального значения.

Известные процедуры поверки шунтов (например, при помощи двойного моста Томпсона; магнитного компаратора; компенсационные и др.) требуют

наличия образцовых мер сопротивления. Эти процедуры трудно реализовать при номинальных значениях сопротивлений шунтов менее 0,1 Ом. Предлагаемый метод позволяет преодолеть эту проблему.

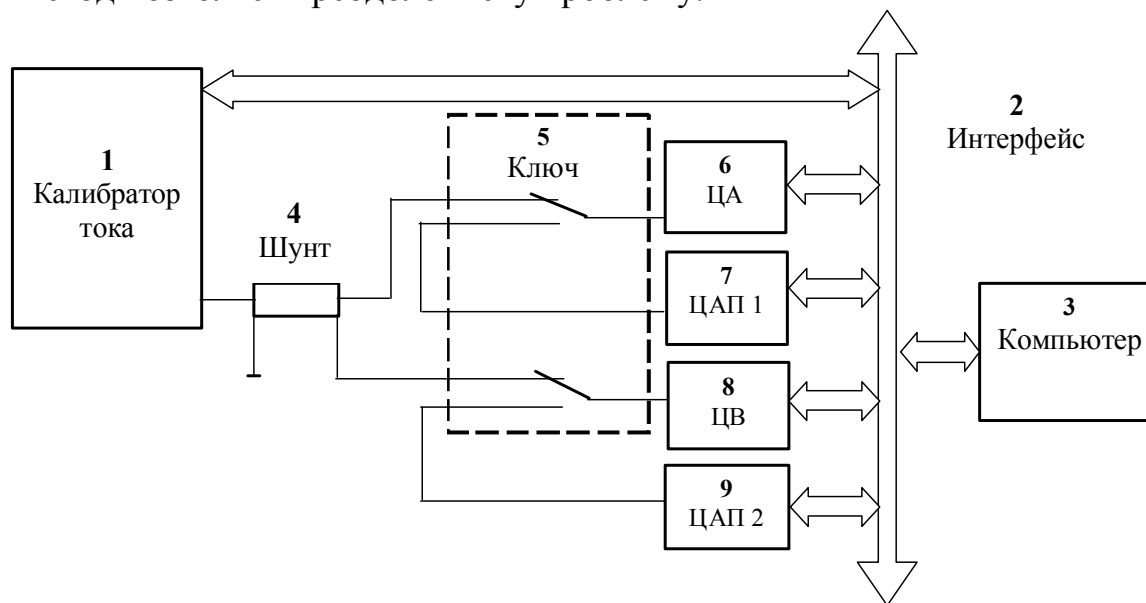


Рис. 7. Структурная схема поверочной установки

Структурная схема реализующей предлагаемый метод поверочной установки приведена на рис. 7. Для описания функции преобразования измерительного канала будем пользоваться следующей формулой:

$$y = x(1 + \gamma) = x\left(1 + \frac{\Delta_0}{x} + \gamma_2\right) = x(1 + \gamma_1 + \gamma_2), \quad (11)$$

где y – результат измерения, x – измеряемая величина, γ – относительная погрешность измерения, Δ_0 – абсолютная аддитивная погрешность, $\gamma_1 = \frac{\Delta_0}{x}$ – относительная аддитивная погрешность, γ_2 – относительная мультипликативная погрешность.

Сопротивление шунта измеряется за два такта следующим образом. В *первом такте* с калибратора тока 1 сигнал подается на поверяемый шунт 4, который характеризуется коэффициентом передачи R , при этом коммутатор 5 токовый выход шунта соединяет с цифровым амперметром (ЦА) 6, а потенциальный выход шунта – с цифровым вольтметром (ЦВ) 8.

Результаты измерения тока I_1 и напряжения V_1 , с учетом (11), имеют вид:

$$\begin{cases} I_1 = I(1 + \gamma_1^a + \gamma_2^a) \\ V_1 = V(1 + \gamma_1^v + \gamma_2^v) \end{cases}, \quad (12)$$

где I – выходной сигнал калибратора тока; V – напряжение на шунте; γ_1^a , γ_2^a – мультипликативная и аддитивная погрешности ЦА; γ_1^v , γ_2^v – мультипликативная и аддитивная погрешности ЦВ.

Цифровые коды результатов измерения I_1 и V_1 сохраняются в памяти компьютера 3 и подаются на входы цифро-аналоговых преобразователей тока (ЦАП1) 7 и напряжения (ЦАП2) 9 соответственно.

Во втором такте с помощью коммутатора 5 сигналы с ЦАП1 и ЦАП2 подаются на ЦА и ЦВ, на выходе которых получают значения:

$$\begin{cases} I_2 = I(1 + \gamma_1^a + \gamma_2^a) \left(1 + \frac{\gamma_1^a}{1 + \gamma_1^a + \gamma_2^a} + \gamma_2^a \right) (1 + \delta_1) \\ V_2 = V(1 + \gamma_1^v + \gamma_2^v) \left(1 + \frac{\gamma_1^v}{1 + \gamma_1^v + \gamma_2^v} + \gamma_2^v \right) (1 + \delta_2), \end{cases} \quad (13)$$

где δ_1 и δ_2 – относительные погрешности ЦАП1 и ЦАП2 соответственно.

Коды результатов I_2 и V_2 запоминаются в компьютере и используются для вычисления скорректированных результатов измерения тока и напряжения:

$$\begin{cases} I_k = \frac{I_1^2}{I_2} = \frac{I}{1 + \delta_1} \left(1 + \frac{\gamma_1^a \gamma^a}{(1 + \gamma^a)^2 - \gamma_1^a \gamma^a} \right) \\ V_k = \frac{V_1^2}{V_2} = \frac{V}{1 + \delta_2} \left(1 + \frac{\gamma_1^v \gamma^v}{(1 + \gamma^v)^2 - \gamma_1^v \gamma^v} \right), \end{cases} \quad (14)$$

Сопротивление шунта R определяют, используя скорректированные значения тока и напряжения I_k и U_k :

$$R = \frac{V_k}{I_k} = \frac{V}{I} \cdot \frac{1 + \frac{\gamma_1^v \gamma^v}{(1 + \gamma^v)^2 - \gamma_1^v \gamma^v}}{1 + \frac{\gamma_1^a \gamma^a}{(1 + \gamma^a)^2 - \gamma_1^a \gamma^a}} \cdot \frac{1 + \delta_1}{1 + \delta_2}. \quad (15)$$

Из формулы (15) видно, что, при стремлении аддитивных составляющих погрешностей γ_1^v и γ_1^a к нулю, $\gamma^v \rightarrow \gamma_2^v$, $\gamma^a \rightarrow \gamma_2^a$ и искомое сопротивление шунта $R \rightarrow \frac{V(1 + \delta_1)}{I(1 + \delta_2)}$ фактически определяется только погрешностями ЦАП1 и ЦАП2. Если обеспечить выполнение условия $\delta_1 \approx \delta_2$, путем специального подбора номиналов R-2R матриц ЦАП, то погрешность измерения сопротивления поверяемого шунта практически полностью компенсируется.

На устройство для проверки получен патент РФ. Предложенный способ апробирован экспериментально с помощью автоматизированной системы, состоящей из калибратора Fluke 5520A, мультиметра Agilent 3458A, компьютера и специально разработанного программного обеспечения в среде LabVIEW. Результаты эксперимента подтвердили возможность коррекции погрешности измерения сопротивления.

В четвертой главе "Расчет неопределенности токового шунта коаксиальной конструкции" разработана методика расчета неопределенности, приписываемой коаксиальному шунту в процессе калибровки, в соответствии с рекомендацией МИ 2552-99. Методика позволяет оценивать границы неопределенности активной составляющей полного сопротивления шунта (на постоянном токе). Влияние реактивной составляющей на динамические характеристики

шунта определялось путем расчета постоянной времени. Учет скин-эффекта позволяет определить рабочий диапазон частот шунта.

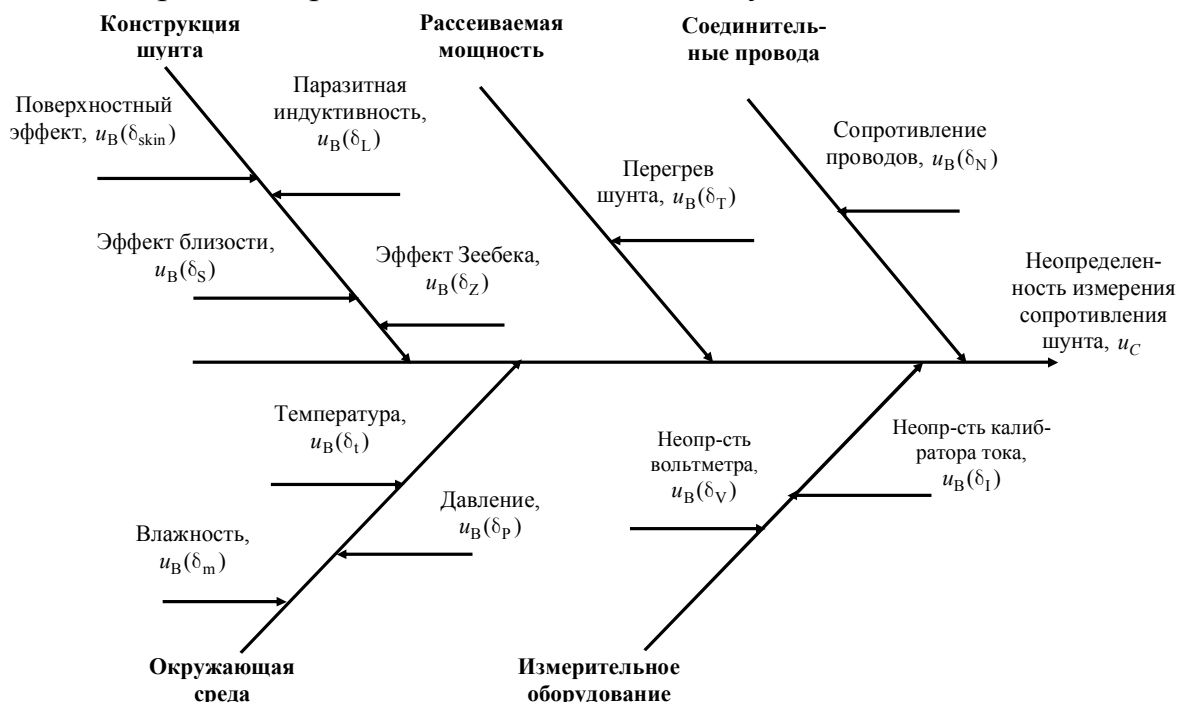


Рис. 8. Диаграмма источников неопределенности шунта

Рассмотрены возможные источники неопределенности шунта (рис.8), определены факторы, влиянием которых можно пренебречь. Составляющие неопределенности и соответствующие значения приведены в табл.1.

Таблица 1

К расчету неопределенности измерения активного сопротивления шунта

Источник неопределенности	Тип	Значение неопределенности	Тип распределения	Коэффициент чувствительности	Вклад стандартной неопределенности
Стандартная неопределенность измерения сопротивления	A	$3,39202 \cdot 10^{-8} \text{ В}$	нормальное	$\frac{1}{I}$	$1,7 \cdot 10^{-9} \text{ Ом}$
Калибратор тока	B	$0,000895 \text{ А}$	равномерное	$\frac{V}{I^2}$	$7,6 \cdot 10^{-9} \text{ Ом}$
Цифровой вольтметр	B	$15,6 \cdot 10^{-12} \text{ В}$	равномерное	$\frac{1}{I}$	$0,78 \cdot 10^{-12} \text{ Ом}$
Изменение температуры шунта	B	$0,29 \cdot 10^{-9} \text{ Ом}$	равномерное	1	$21 \cdot 10^{-9} \text{ Ом}$
Суммарная неопределенность		$u_C^2 = u_A^2(\delta_A) + u_B^2(\delta_I) + u_B^2(\delta_V) + u_B^2(\delta_T)$			$23 \cdot 10^{-9} \text{ Ом}$
Расширенная неопределенность		$u_{0,95} = k \cdot u_C; \quad k = 2$			$50 \cdot 10^{-9} \text{ Ом}$

Постоянная времени шунта от паразитной индуктивности L определена по формуле

$$\tau_L = \frac{L_M}{R_{Sh}} \quad (16)$$

Расчет по формуле (16) дает значение $\tau_L = 9,3$ мкс, где значение паразитной индуктивности L_M получено путем моделирования магнитного поля шунта.

Постоянная времени от поверхностного эффекта определена по формуле

$$\tau_{skin} = -\frac{\mu \Delta_I^2}{6\rho}, \quad (17)$$

где Δ – толщина резистивного цилиндра, ρ – удельное сопротивление манганина, μ – магнитная постоянная. Расчет по формуле (17) дает значение $\tau_{skin} = -1,1$ мкс. Находим суммарную постоянную времени шунта по формуле

$$\tau = \tau_L + \tau_{skin} = 9,3 - 1,1 = 8,2 \text{ мкс}. \quad (18)$$

Рабочий диапазон частот определен по формуле

$$R_a = R(1 + 4\pi^2 f^2 \tau_L - 4\pi^2 f^2 \tau^2). \quad (19)$$

Таблица 2

Характеристики коаксиального шунта

Характеристика	Значение	Единица измерения
Активное сопротивление	169,37	мкОм
Расширенная неопределенность	0,05	мкОм
	0,03	%
Постоянная времени	8,2	мкс
Частотный диапазон	1	МГц

В пятой главе "Система измерения больших токов в составе технологической установки для точечной контактной сварки" рассмотрено применение резистивного шунта



Рис. 9. Система измерения больших токов

Разработанная для ОАО «Новосибирский завод химконцентратов» система измерения больших токов (СИБТ) значительно повысила достоверность измерений мгновенных и действующих значений тока в сварочной цепи, что позволило оптими-

коаксиальной конструкции в качестве первичного преобразователя системы измерения больших токов СИБТ (рис. 9), дано описание структуры и принципа работы системы.



Рис. 10. Внешний вид коаксиального шунта

зировать алгоритм модуляции тока и стабилизировать качественные показатели процесса точечной контактной сварки изделий ответственного назначения.

СИБТ имеет следующие технические характеристики: диапазон измерений мгновенного значения амплитуды импульсного тока – 5...20 кА; диапазон измерений длительности импульса 0,1...200 мс; напряжение питания 220 В, 50 Гц.

В приложениях приведены акт внедрения и сертификат об утверждении типа средств измерений.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ и выбор коаксиальной конструкции измерительного резистивного преобразователя тока в напряжение, обеспечивающей осциллографирование формы тока с точностью не хуже 0,1 %.
2. Разработана и исследована в пакете ANSYS конечно-элементная модель электромагнитного поля коаксиального шунта, позволяющая минимизировать и количественно оценивать реактивную составляющую неопределенности коэффициента преобразования шунта.
3. Предложена и программно реализована в графической среде LabVIEW методика расчета механических и электрических параметров шунтов коаксиальной конструкции, позволяющая автоматизировать инженерные вычисления параметров шунтов применительно к конкретной измерительной задаче с целью оценки и выбора возможных вариантов конструкции шунтов.
4. Разработана и экспериментально проверена методика калибровки (поверки) шунтов на постоянном и переменном токах, основанная на коррекции мультипликативной составляющей неопределенности коэффициента преобразования шунта с помощью обратного преобразования выходного сигнала измерительного канала.
5. Предложена методика расчета неопределенности коаксиального шунта, позволяющая оценивать его динамические характеристики с учетом значения паразитной индуктивности, полученного на основе данных конечно-элементного моделирования электромагнитного поля шунта.
6. Результаты работы применены для создания мобильной компьютерной системы измерения больших токов СИБТ для измерения формы импульсов сварочного тока длительностью 0,1...200 мс и амплитудой 5 ... 20 кА в процессе контактной сварки, неопределенность коэффициента преобразования шунта 0,03 %.
7. Компьютерная система измерения больших токов используется в ОАО "Новосибирский завод химконцентратов" (г. Новосибирск). Система прошла процедуру утверждения типа, зарегистрирована в Государственном реестре средств измерений за № 28856-05 и допущена к применению в Российской Федерации.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Наталинова Н.М.** Контроль качества процесса сварки // *Качество - стратегия XXI века: Материалы XI международной научно-практической конференции* (Томск, 7 декабря 2006 г.), Томск: Изд. ТПУ, 2006. – С. 139-140.
2. **Наталинова Н.М.** Расчет первичного преобразователя системы измерений токов СИБТ // *Наука, технологии, инновации: Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых* (Новосибирск, 7-10 декабря 2006 г.). – Новосибирск: НГТУ, 2006 – т. 2. – С. 42-43.
3. **Наталинова Н.М.** Первичный преобразователь бесконтактной системы измерений параметров импульсов больших токов // *Современные техника и технологии: Труды XIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых* (Томск, 26-30 марта 2007 г.), Томск: Изд. ТПУ, 2007 – т. 1. – С. 213-214.
4. **Наталинова Н.М.** Оценка качества конструкций трубчатых шунтов // *Репутация и качество*, 2007, № 9, Спецвыпуск. – С. 57.
5. **Наталинова Н.М.** Моделирование магнитных полей плоских и трубчатых резистивных шунтов унифилярной и бифилярной конструкции // *Современные техника и технологии: Труды XIV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных* (Томск, 24-28 марта 2008 г.), Томск: Изд. ТПУ, 2008. – т. 1. – С. 177-179.
6. **Наталинова Н.М.** Исследование магнитных полей резистивных шунтов с помощью программы ANSYS // *Труды 8-й Конференции пользователей CADFEM* (Москва, 23-24 апреля 2008 г.), М.: CADFEM GmbH, 2008. – С. 29-31.
7. **Наталинова Н.М.** Неопределенность измерения сопротивления токового шунта и метод его поверки // *Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения* (УКИ'08): Труды Российской конференции с международным участием (Москва, 10-12 ноября 2008 г.) – М.: Институт проблем управления РАН, 2008. – С. 613-619.
8. **Наталинова Н.М., Пермякова И.А.** Сравнительный анализ расчета неопределенности и оценивания характеристик погрешности измерений сопротивления шунта // *Наука, технологии, инновации: Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых* (Новосибирск, 4-7 декабря 2008 г.). – Новосибирск: НГТУ, 2008 – т. 1. – С. 175-177.
9. **Патент РФ № 80585.** Устройство для поверки шунтов / Муравьев С.В., Борилов В.Н., Наталинова Н.М. *Бюл. № 4*, опубли. 10.02.2009.
10. **Muravyov S.V., Borikov V.N., Natalinova N.M.** A Computer System: Measurement of Welding Surge Current // *Measurement & Control*. – Vol. 42/2 March, 2009. – P. 44-47.
11. **Наталинова Н.М., Пермякова И.А.** Расчет параметров коаксиальных шунтов для измерения импульсного тока // *Современные техника и технологии: Труды XV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых* (Томск, 4-8 мая 2009), Томск: Изд. ТПУ, 2009. – т. 1. – с. 196-198.

Подписано к печати 17.11.2009. Формат 60x84/18. 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 9001:2000

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