

На правах рукописи



Баранов Павел Федорович

**СИНХРОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАЗНОСТИ
СИГНАЛОВ С БОЛЬШОЙ СИНФАЗНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ**

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель: **Бориков Валерий Николаевич**,
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Зыков Владимир Михайлович**,
доктор технических наук, старший научный
сотрудник, зав. лабораторией
Национального исследовательского Томского
политехнического университета

Свинолупов Юрий Григорьевич,
кандидат технических наук, доцент, замести-
тель генерального директора ОАО «Мано-
томь»

Ведущая организация: **Национальный исследовательский уни-
верситет «Московский энергетический
институт», г. Москва**

Защита состоится «8» октября 2013 г. в 17 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: Россия, 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215 (актовый зал).

С диссертационной работой можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: г. Томск, ул. Белинского, 55.

Автореферат разослан __ сентября 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук

Е.А. Васендина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Непрерывно возрастающие требования к точности и достоверности измерений физических величин стимулируют непрерывное совершенствование измерительной техники, в частности измерительных преобразователей (ИП) физической величины в напряжение переменного тока, что в свою очередь требует опережающей разработки новых средств их метрологического обеспечения.

При подтверждении метрологических характеристик ИП максимальную точность обеспечивает метод сравнения с мерой. Практическое применение метода невозможно без наличия высокочувствительных приборов сравнения, разрешающая способность которых во многом определяет минимальную погрешность измерений.

В качестве приборов, обеспечивающих разрешающую способность порядка единиц нановольт при сравнении двух переменных сигналов в широком динамическом диапазоне частот и напряжений, распространение получили синхронные усилители с дифференциальным входом (СУДВ) для измерения разности двух сигналов, в англоязычной литературе Lock-In Amplifier. В отечественной литературе синхронные усилители с дифференциальным входом также именуют как дифференциальный указатель и дифференциальный нановольтметр.

Для метрологического обеспечения ИП, таких как индуктивные делители напряжения (ИДН), токовые шунты и т.д., при определении амплитудно-частотных характеристик цифро-аналоговых и аналого-цифровых преобразователей с учетом достигнутых разрядностей последних, необходимо обеспечить сравнение синфазных напряжений до 10 В среднеквадратического значения с разрешающей способностью до 10 нВ.

Современные СУДВ позволяют сравнивать напряжения с амплитудами не более 3 В и при заявленной максимальной разрешающей способности до 2 нВ имеют коэффициент ослабления синфазного сигнала около 100 – 120 дБ, что при сравнении двух напряжений с амплитудами около 1 В даст реальную разрешающую способность не более 10 – 1 мкВ.

Целью диссертационной работы является разработка, исследование, аппаратно-программная реализация и экспериментальная апробация синхронного усилителя с дифференциальным входом для измерения разности сигналов с повышенной разрешающей способностью на уровне большой синфазной составляющей.

В соответствии с поставленной целью были сформулированы следующие **задачи исследования**:

1. Анализ функциональных блоков структуры СУДВ с целью выявления источников погрешностей, и синтез новых схмотехнических и алгоритмических решений для их минимизации или компенсации.

2. Исследование факторов ограничивающих разрешающую способность СУДВ и разработка способов ее увеличения.
3. Разработка и апробация синхронного усилителя с дифференциальным входом для проведения работ по поверке индуктивных делителей напряжения и токовых шунтов с возможностью дистанционного управления для использования в составе автоматизированных измерительных систем.
4. Оценка метрологических характеристик разработанного синхронного усилителя с дифференциальным входом и их сравнение с характеристиками серийно выпускаемых аналогов.

Методы исследования. Теоретическая часть работы выполнена на основе методов теории электрических цепей, теории графов, теории погрешностей, дифференциального и интегрального исчисления, математического моделирования. При расчетах и моделировании использовались программные пакеты Mathcad, Multisim, Statistica, LabVIEW. Экспериментальные исследования проводились в метрологических лабораториях.

Достоверность полученных результатов обеспечивалась экспериментальной апробацией синхронного усилителя с дифференциальным входом с применением средств измерений утвержденного типа, прошедших поверку, а так же совпадением с достаточной точностью расчетных данных и результатов моделирования и эксперимента.

Разработанный в ходе диссертационной работы синхронный усилитель с дифференциальным входом используется для метрологического обеспечения индуктивных делителей напряжения во Всероссийском Научно-Исследовательском Институте Физико-Технических и Радиотехнических Измерений (ВНИИФТРИ).

Научная новизна работы

1. Разработана и исследована схема выделения дифференциального сигнала на основе двух инструментальных усилителей и повторителя напряжения, позволяющая увеличить коэффициент ослабления синфазного сигнала.
2. Разработан и экспериментально апробирован синхронный усилитель с дифференциальным входом, с повышенной разрешающей способностью на уровне большой синфазной составляющей.
3. Предложена и экспериментально проверена процедура измерения на переменном токе модуля сопротивления и фазового сдвига коэффициента преобразования токовых шунтов с высоким разрешением на основе разработанного синхронного усилителя.

Практическая ценность работы. Разработанный в ходе диссертационных исследований синхронный усилитель с дифференциальным входом может найти широкое применение для определения: относительных отклонений физических величин в мостовых и дифференциальных схемах; метрологических характеристик компонентов измерительной техники, таких как погрешность преобразования аналого-цифровых и цифро-аналоговых устройств, коэффициент

ослабления аттенуаторов, коэффициент усиления операционных усилителей. Синхронный усилитель с дифференциальным входом может использоваться в составе автоматизированных измерительно-информационных систем для проверки и калибровки делителей напряжения, трансформаторов тока, токовых шунтов.

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

- Изготовление и поставка автоматизированного измерительного комплекса по заказу ВНИИ физико-технических и радиотехнических измерений, 2010 г., х/д 1-76/10у.
- 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 «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на проведение исследований по теме «Система контроля магнитного окружения квантового процессора на основе феррозондового датчика сверхвысокого разрешения», 2010-2012 гг., госконтракт № 14.740.11.0950.
- 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 ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на проведение исследований по теме «Разработка высокопроизводительного модульного приборного комплекса для автоматизированных систем экспериментальных исследований и управления электрофизическими установками ядерной энергетики», 2012-2013 гг., соглашение № 14.В37.21.0457.

Результаты работы используются для метрологического обеспечения индуктивных делителей напряжения во ВНИИФТРИ. Акты внедрения приложены к диссертационной работе.

Положения, выносимые на защиту

1. Использование инструментального усилителя и повторителя напряжения для организации следящего питания схемы выделения дифференциального сигнала позволяет увеличить коэффициент ослабления синфазного сигнала до 160 – 180 дБ в диапазоне частот до 100 кГц.
2. Использование разработанного синхронного усилителя с дифференциальным входом, позволяет производить сравнение двух

напряжений амплитудой до $10\sqrt{2}$ В с разрешающей способностью до 10 нВ в диапазоне частот от 20 Гц до 100 кГц.

3. Процедура измерения коэффициента преобразования токовых шунтов на основе разработанного синхронного усилителя с дифференциальным входом позволяет повысить разрешающую способность до 10 нОм по модулю сопротивления и 1° по фазовому сдвигу.

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

- Седьмая Международная научно-практическая конференция «Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments», г. Москва, 2008 г.;
- XV Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии СТТ 2009 (МТТ-2009)», г. Томск, 2009 г.;
- VIII Международная IEEE Сибирская конференция по управлению и связи (SIBCON-2009), г. Томск, 2009 г.;
- 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.;
- XVIII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии СТТ 2012», г. Томск, 2012 г.;
- XX Международный конгресс ИМЕКО, г. Пусан, Республика Корея, 2012 г.;
- XIX Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии СТТ 2013», г. Томск, 2013 г.;

Публикации Основные результаты исследований отражены в 28 публикациях: двенадцать статей в ведущих научных журналах и изданиях, рекомендуемых ВАК; одна статья в рецензируемом научном журнале; пятнадцать статей в сборниках трудов международных и российских конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 156 наименований и

приложений. Работа содержит 155 страниц основного текста, включая 60 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 «Синхронные усилители с дифференциальным входом» рассмотрен объект исследования – синхронный усилитель для измерения разности входных сигналов, чувствительный только к заданной частоте и выходной сигнал которого пропорционален опорному сигналу. Типовой задачей подобных устройств является выделение малой дифференциальной составляющей сравниваемых напряжений в нановольтовом и микровольтовом диапазонах при отношении сигнал/шум до $-60...-100$ дБ, с обеспечением высокого импеданса по измерительным входам.

Проведенный обзор синхронных усилителей с дифференциальным входом показывает, что современные СУДВ реализуют метод одновременного сличения сравниваемых напряжений по амплитудам синфазных составляющих, с усилением разностного сигнала, его синхронным детектированием, фильтрацией и представлением в цифровом и аналоговом видах.

Структурная схема и векторная диаграмма измерений простейшего СУДВ такого типа представлена на рис. 1.

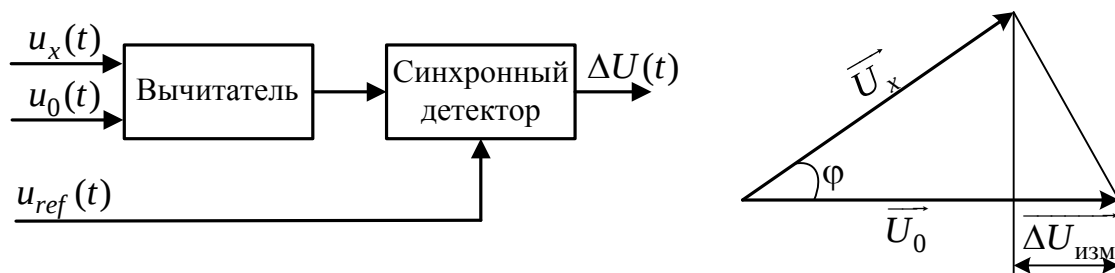


Рис.1. Структурная схема и векторная диаграмма напряжений СУДВ

Выходная величина простейшего СУДВ определяется выражением:

$$\Delta U \approx \frac{1}{E} \left(\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \left[u_x(t) - u_0(t) + \frac{u_x(t) + u_0(t)}{2K_{\text{ОСС}}} \right] u_{\text{ref}}(t) dt \right), \quad (1)$$

где E – значение деноминатора синхронного детектора, В;
 $u_0(t)$, $u_x(t)$ – значения сравниваемых входных сигналов, В;
 $u_{\text{ref}}(t)$ – значение опорного сигнала, В;
 $K_{\text{ОСС}}$ – коэффициент ослабления синфазного сигнала.

Из (1) и векторной диаграммы (рис. 1) следует, что измерение разности ΔU сигналов $u_0(t)$ и $u_x(t)$ сопровождается погрешностью, которая зависит от фазового сдвига φ между входными сигналами, конечного подавления синфазного

сигнала $K_{\text{ОСС}}$ схемы сравнения (вычитателя) и некогерентности опорного $u_{\text{ref}}(t)$ и детектируемого сигналов на входах синхронного детектора характеризуемой фазовым сдвигом φ_{ref} . Измеренная разность $\Delta U_{\text{изм}}$ длин двух векторов $\vec{U}_0$ и $\vec{U}_x$ определяется формулой:

$$\Delta U_{\text{изм}} = \Delta U (\gamma_{\varphi} + \gamma_{\text{сф}}), \quad (2)$$

где $\gamma_{\varphi} = K_{\text{сд}} \left[\cos(\varphi_{\text{ref}} - \varphi) + \frac{U_0 \cos(\varphi_{\text{ref}} - \varphi) - U_0 \cos(\varphi_{\text{ref}})}{\Delta U} \right]$ – фазовая погрешность;

$K_{\text{сд}}$ – коэффициент передачи синхронного детектора;

$\gamma_{\text{сф}}$ – погрешность, обусловленная конечным значением подавления синфазного сигнала;

φ_{ref} – фазовый сдвиг между детектируемым вектором и опорным напряжением, рад.

Для проведения работ по поверке и калибровке ИП методом сравнения с мерой, необходимо обеспечить сравнение напряжений до 10 В среднеквадратического значения с разрешающей способностью до 10 нВ. Реальная чувствительность современных СУДВ ограничена коэффициентом ослабления синфазного сигнала порядка 100 – 120 дБ, а максимальное входное напряжение не превышает 3 В, что недостаточно для метрологического обеспечения широкого класса ИП.

Разработка, аппаратно-программная реализация и экспериментальная апробация синхронного усилителя с дифференциальным входом для измерения разности сигналов с разрешающей способностью до 10 нВ с синфазной составляющей до 10 В среднеквадратического значения должны быть проведены в ходе диссертационной работы.

Во второй главе «Повышение разрешающей способности СУДВ» рассматриваются факторы, ограничивающие разрешающую способность и диапазон сравниваемых напряжений СУДВ и разрабатываются схемы построения входного каскада СУДВ для выделения дифференциального сигнала. Входной каскад СУДВ, обеспечивающий одновременное сравнение двух напряжений и выделение дифференциального сигнала, является ключевым с точки зрения обеспечения требуемых динамического диапазона сравниваемых напряжений и максимальной разрешающей способности.

Для выделения дифференциального сигнала предложено использовать инструментальный усилитель (ИУ) в интегральном исполнении с программируемым коэффициентом усиления. Выбор таких ИУ обусловлен тем, что $K_{\text{ОСС}}$ не зависит от выходных сопротивлений источников сравниваемых сигналов и зависимость $K_{\text{ОСС}}$ от внутренних сопротивлений каскадов ИУ минимизирована технологически. На основе анализа параметров различных ИУ для выделения дифференциального сигнала в диапазоне частот до 100 кГц предложено использовать микросхему PGA207 фирмы Texas Instruments.

Проблема расширения динамического диапазона сравниваемых сигналов до $10\sqrt{2}$ В с разрешающей способностью до 10 нВ связана с малым напряжением питания ИУ и недостаточным подавлением синфазного сигнала. При сравнении двух одинаковых по амплитуде синфазных напряжений равных 10 В с помощью микросхемы PGA207, выходной сигнал составит около 100 мкВ на частоте 1 кГц и будет возрастать с увеличением частоты сравниваемых сигналов.

Для комплексного решения данных проблем предложена схема организации следящего питания и выделения дифференциального сигнала на основе двух инструментальных усилителей и повторителя напряжения (рис. 2).

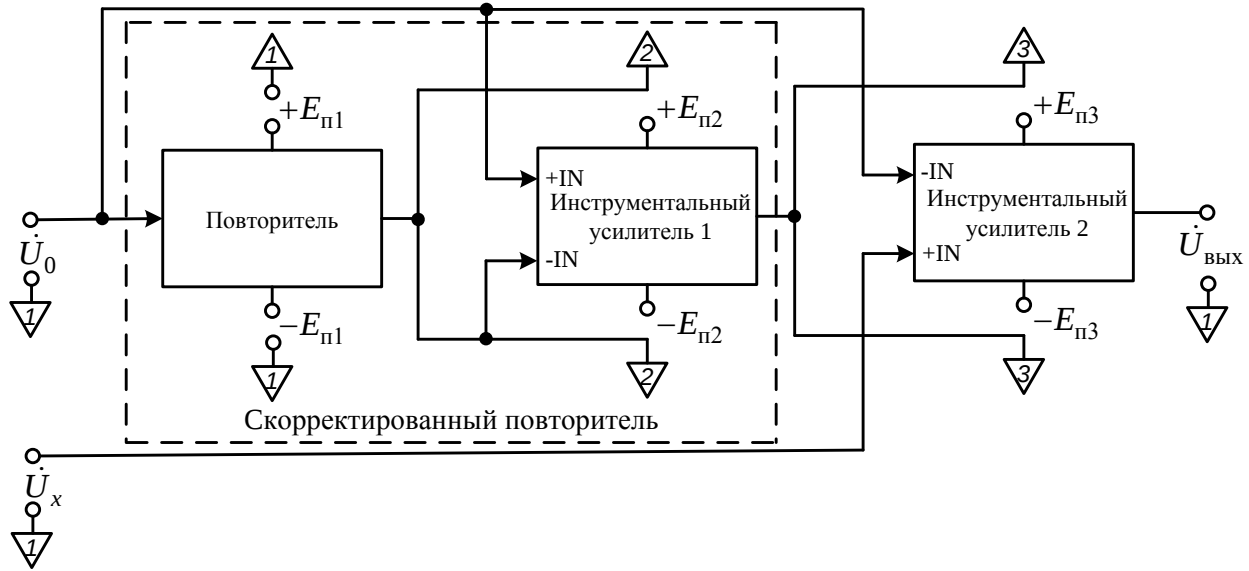


Рис. 2. Схема выделения дифференциального сигнала

Первый ИУ используется для коррекции коэффициента передачи повторителя напряжения, выполненного по схеме усилителя с глубокой отрицательной обратной связью, а второй ИУ для выделения дифференциального сигнала. Напряжение на выходе второго ИУ относительно потенциала земли ∇ определяется по формуле:

$$\dot{U}_{\text{ВЫХ}} = K_{\text{д}} \left[\dot{U}_x - \dot{U}_0 + \frac{\dot{U}_x + \dot{U}_0}{2\dot{K}_{\text{ОСС}}} - \frac{\dot{U}_0 \dot{K}_{\text{П(К)}}}{\dot{K}_{\text{ОСС}}} \right], \quad (3)$$

где $\dot{K}_{\text{П(К)}}$ – скорректированный коэффициент передачи повторителя;
 $K_{\text{д}}$ – коэффициент усиления дифференциального сигнала.

Для оценки ослабления синфазного сигнала было проведено схемотехническое моделирование скорректированного повторителя в программе Multisim и получены его амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики. Модуль напряжения на выходе второго ИУ PGA207 с коэффициентом усиления дифференциального сигнала равным 10, при синфазных входных сигналах $U_0 = U_x = 10$ В рассчитан по формуле:

$$|U_{\text{ВЫХ}}| = \sqrt{U_0^2 \cdot \frac{1 - 2K_{\text{П(К)}} \cos(\varphi_{\text{П}}) + K_{\text{П(К)}}^2}{K_{\text{ОСС}}^2}}. \quad (4)$$

Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты моделирования и расчета схемы выделения дифференциального сигнала

Частота, кГц	Модуль $K_{П(К)}$	Фаза $K_{П(К)}$, град	$ U_{\text{вых(ИУ2)}} $, В
0,1	1,000001	$-0,86 \cdot 10^{-6}$	$1,01 \cdot 10^{-10}$
1	1,000002	$-8,65 \cdot 10^{-6}$	$2,01 \cdot 10^{-10}$
10	1,000003	$-87,1 \cdot 10^{-6}$	$1,02 \cdot 10^{-9}$
20	1,000011	$-164 \cdot 10^{-6}$	$6,59 \cdot 10^{-9}$
30	1,000022	$-203 \cdot 10^{-6}$	$1,92 \cdot 10^{-8}$
40	1,000036	$-136 \cdot 10^{-6}$	$4,14 \cdot 10^{-8}$
50	1,000049	$115 \cdot 10^{-6}$	$7,02 \cdot 10^{-8}$
60	1,000061	$794 \cdot 10^{-6}$	$1,07 \cdot 10^{-7}$
70	1,000064	$1,95 \cdot 10^{-3}$	$1,45 \cdot 10^{-7}$
80	1,000059	$3,98 \cdot 10^{-3}$	$2,08 \cdot 10^{-7}$
90	1,000041	$6,36 \cdot 10^{-3}$	$1,84 \cdot 10^{-7}$
100	1,000017	$11,8 \cdot 10^{-3}$	$8,91 \cdot 10^{-7}$

Из таблицы 1 видно, что предложенная схема позволяет увеличить коэффициент ослабления синфазного сигнала до 160 – 200 дБ в диапазоне частот до 100 кГц и достичь разрешающей способности 1 нВ в диапазоне частот до 20 кГц, 10 нВ в диапазоне частот до 60 кГц и 100 нВ в диапазоне частот до 100 кГц.

Расчет относительной погрешности результата измерений от некогерентности опорного и детектируемого сигналов на входах синхронного детектора при фазовом сдвиге до 20° производился по упрощенной формуле:

$$\gamma = \frac{\Phi_{ref}^2}{2} \cdot 100 \%. \quad (5)$$

При разнице фаз в 5° между детектируемым и опорным напряжениями погрешность не превышает 0,5 %.

Уменьшение погрешности от фазового сдвига между сравниваемыми сигналами осуществляется синхронным детектированием разностного вектора на синфазный и квадратурный опорные сигналы. На первый вход схемы выделения дифференциального сигнала подается эталонное напряжение $u_0(t) = U_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi_0)$, а на второй сравниваемое напряжение $u_x(t) = (U_x + \Delta U) \cdot \sin(\omega t + \varphi_0)$, в качестве опорных сигналов используются квазисинусоидальные напряжения:

$$\begin{aligned} u_{ref.c}(t) &= U_{ref} \sin(\omega t + \varphi_{ref}); \\ u_{ref.k}(t) &= U_{ref} \sin(\omega t + \varphi_{ref} - \pi/2); \\ \varphi_{ref} &= \varphi_0. \end{aligned} \quad (6)$$

После синхронного детектирования синфазная ΔU_c и квадратурная ΔU_k составляющие разностного сигнала соответственно равны:

$$\begin{aligned} \Delta U_c &= K_{cd} [U_0 \cos(\varphi_0 - \varphi_x) - U_0 + \Delta U \cos(\varphi_0 - \varphi_x)]; \\ \Delta U_k &= K_{cd} [U_0 \sin(\varphi_0 - \varphi_x) + \Delta U \sin(\varphi_0 - \varphi_x)]. \end{aligned} \quad (7)$$

Вектора эталонного и сравниваемого напряжений, а также их разностный вектор образуют на комплексной плоскости треугольник (рис. 3).

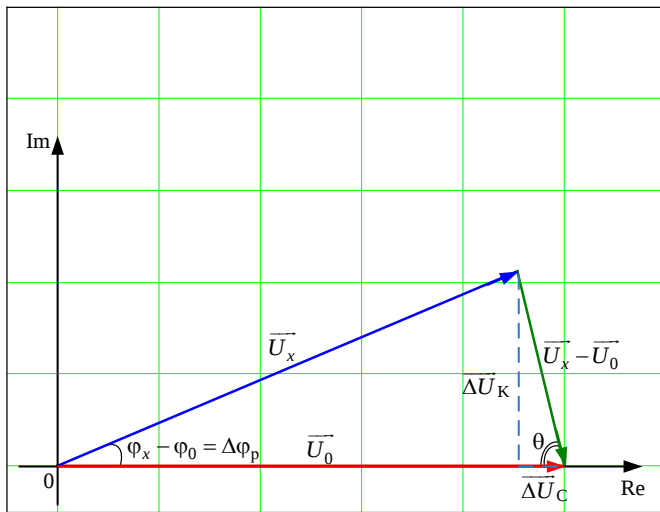


Рис. 3. Представление сравниваемых векторов на комплексной плоскости

На основании этого угол θ определяется формулой:

$$\theta = \arctg\left(\frac{\Delta U_K}{\Delta U_C}\right). \quad (8)$$

Так, как амплитуды сравниваемых напряжений много больше их разницы, полученный треугольник можно принять равнобедренным и угол между сравниваемыми векторами определяется формулой:

$$\Delta\varphi_p = \pi - 2\theta \approx \varphi_x - \varphi_0, \quad (9)$$

а амплитудная разница между сравниваемыми векторами выражением:

$$\Delta U = \frac{\Delta U_c - U_0 \cos(\Delta\varphi_p) + U_0}{-\cos(\Delta\varphi_p)} \quad (10)$$

Анализ влияния соотношения ΔU к U_0 на результат вычисления фазового сдвига $\Delta\varphi_p$ показал, что погрешность прямо пропорциональна изменению отношения $\Delta U/U_0$. При этом погрешность вычисления амплитудной разницы между сравниваемыми векторами, будет тем меньше, чем меньше погрешность вычисления фазового сдвига между этими векторами.

В третьей главе «Разработка СУДВ для сличения метрологических характеристик измерительных преобразователей» приводится описание аппаратной реализации СУДВ на основе предложенных во второй главе решений и процедура оценивания его метрологических характеристик.

Структурная схема разработанного СУДВ приведена на рис. 4.

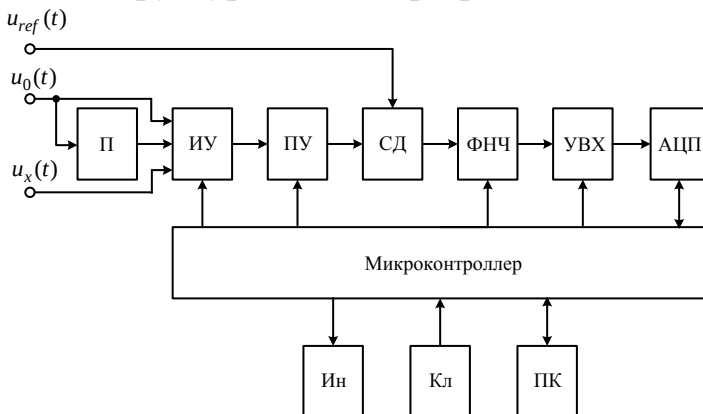


Рис. 4. Структурная схема СУДВ

В состав СУДВ входят: повторитель напряжения (П), инструментальный усилитель (ИУ), усилитель с программируемым коэффициентом усиления (ПУ), синхронный детектор (СД), фильтр нижних частот (ФНЧ), устройство выборки-хранения (УВХ), аналого-цифровой преобразователь (АЦП), микроконтроллер, цифровой и стрелочный индикаторы (Ин), клавиатура (Кл) и персональный компьютер (ПК).

Использование УВХ позволяет ослабить влияние остаточного напряжения синфазной составляющей разностного сигнала за счет введения операции калибровки измерительного тракта СУДВ, при которой на оба входа схемы выделения дифференциального сигнала подается один и тот же сигнал $u_0(t)$.

Для дистанционного управления СУДВ в среде графического программирования LabVIEW было разработано специальное программное обеспечение (ПО). Внешний вид разработанного СУДВ и лицевая панель виртуального прибора для его управления представлены на рис. 5.



Рис. 5. Разработанный синхронный усилитель с дифференциальным входом и лицевая панель виртуального прибора

Метрологические характеристики реализованного СУДВ были определены экспериментально с использованием генератора–калибратора Fluke 5520 A и шестидекадного ИДН ДИ-3м из состава установки К2-41. ИДН ДИ-3м имеет два выхода: основной – выход с младшей декады («Вых. 2») и дополнительный – выход с первой декады («Вых. 1»). Таким образом, были получены сигналы с заданными синфазным и разностным напряжениями, подаваемые на входы СУДВ.

Схема для определения разрешающей способности СУДВ, динамического диапазона и диапазона частот сравниваемых напряжений представлена на рис. 6.

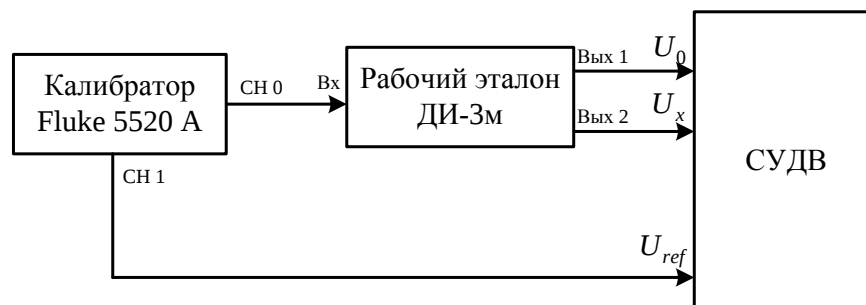


Рис. 6. Схема определения метрологических характеристик СУДВ

Разработанный синхронный усилитель с дифференциальным входом по своим метрологическим характеристикам превышает зарубежные аналоги и обеспечивает сравнение двух синусоидальных напряжений амплитудой от $10\sqrt{2}$ мкВ до $10\sqrt{2}$ В с разрешающей способностью до 10 нВ в диапазоне частот от 20 Гц до 100 кГц.

В четвертой главе «СУДВ в составе автоматизированной измерительной системы» обсуждается использование разработанного СУДВ в составе автоматизированных измерительных информационных систем (АИИС) для проверки и

калибровки измерительных преобразователей – токовых шунтов и индуктивных делителей напряжения.

На рис. 7. представлена схема для измерения модуля и фазового сдвига коэффициента преобразования токовых шунтов, на основе разработанного СУДВ.

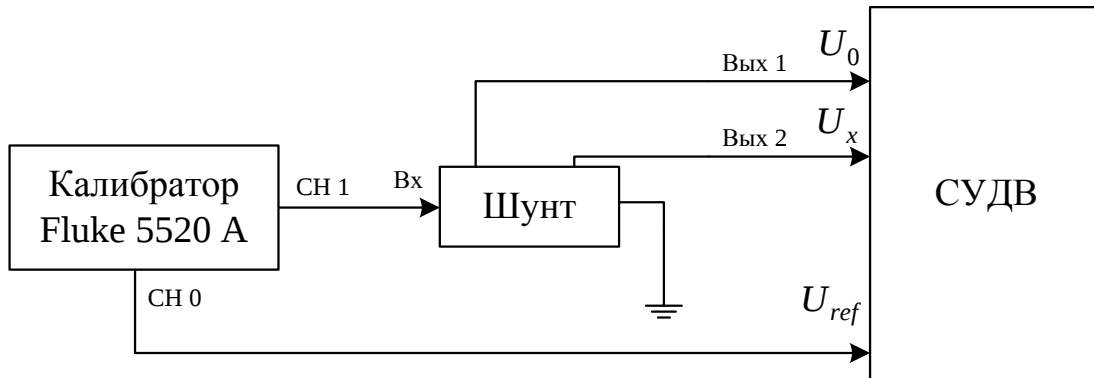


Рис. 7. Схема измерения коэффициента преобразования шунта

Измерение коэффициента преобразования проводится в два этапа. На первом этапе с выхода канала CH0 калибратора на СУДВ подается опорное напряжение переменного тока, а с выхода канала CH1 на шунт подается ток той же частоты с нулевым фазовым сдвигом относительно опорного напряжения. С помощью СУДВ измеряется разность напряжений между потенциальными выводами шунта соответствующая проекции на синфазный вектор. На втором этапе с выхода канала CH1 калибратора на шунт подается ток с фазовым сдвигом -90° относительно опорного напряжения и с помощью СУДВ измеряется разность напряжений между потенциальными выводами шунта, соответствующая проекции на квадратурный вектор.

Модуль R_f и фазовый сдвиг θ_R коэффициента преобразования шунта рассчитываются по формулам:

$$R_f = \frac{\sqrt{\Delta U_c^2 + \Delta U_k^2}}{I_f}; \quad (11)$$

$$\theta_R = \arctg \left(\frac{\Delta U_k / I_f}{\Delta U_c / I_f} \right), \quad (12)$$

где I_f – значение переменного тока, установленное на калибраторе, А;

ΔU_c – синфазная составляющая разностного сигнала, В;

ΔU_k – квадратурная составляющая разностного сигнала, В.

Проверка предложенной процедуры осуществлялась на коаксиальном шунте с номинальным сопротивлением на постоянном токе 750 мкОм. Измерения модуля и фазового сдвига коэффициента преобразования проводились при токе 0,1 А в диапазоне частот от 1 кГц до 30 кГц и сравнивались со значениями полученными расчетным путем. Результаты экспериментально определенных модуля и фазового сдвига коэффициента преобразования шунта, а так же их значения, полученные расчетным путем, приведены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты определения модуля и фазового сдвига коэффициента преобразования шунта при токе 0,1 А

Частота, кГц	Модуль коэффициента преобразования теоретический, мкОм	Фазовый сдвиг теоретический, град	Измеренный модуль коэффициента преобразования, мкОм	Измеренный фазовый сдвиг, град	Погрешность измерения модуля коэффициента преобразования, %	Погрешность измерения фазового сдвига, град
1	74,99	-0,175	74,46	0,077	0,71	-0,252
5	74,99	-0,877	74,38	-0,925	0,80	0,048
10	74,98	-1,753	74,32	-1,968	0,87	0,215
15	74,97	-2,630	74,31	-2,975	0,88	0,345
20	74,94	-3,506	74,29	-4,064	0,86	0,558
25	74,91	-4,382	74,26	-5,122	0,86	0,740
30	74,87	-5,257	74,24	-6,068	0,84	0,811

Результаты эксперимента подтверждают возможность измерения на переменном токе модуля и фазового сдвига коэффициента преобразования токовых шунтов с разрешающей способностью до 10 нОм по модулю сопротивления и 1° по фазовому сдвигу.

На рис. 8 изображена структурная схема АИИС для измерения погрешности коэффициента передачи ИДН дифференциальным методом с использованием разработанного СУДВ.

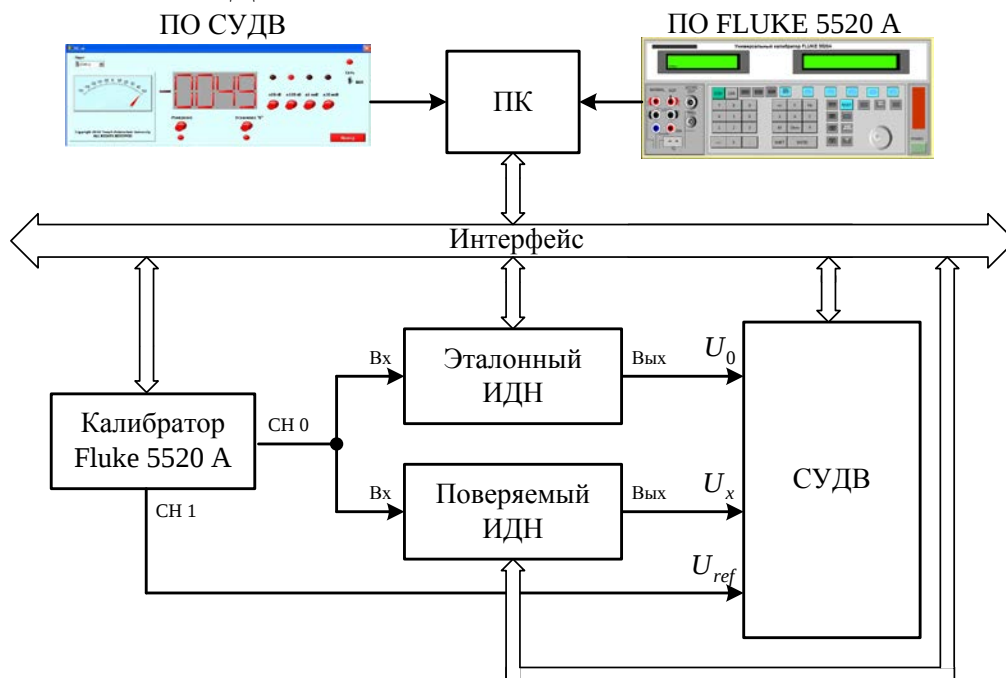


Рис. 8. Схема измерения погрешности коэффициента передачи ИДН

АИИС позволяет измерять коэффициент передачи поверяемого ИДН на заданной частоте с разрешающей способностью до 10 нВ и определять входной импеданс. Использование технологии виртуальных приборов и модульного программирования при разработке ПО позволило минимизировать экономические и временные издержки, создать дружественный графический интерфейс с

пользователем. СУДВ в составе АИИС позволило повысить производительность поверочных и калибровочных работ.

В приложениях диссертации приведены акты внедрения результатов диссертационной работы, сравнительный анализ коммерчески доступных СУДВ, проект методики поверки индуктивных делителей напряжения на основе разработанного СУДВ и руководство оператора по работе с программным обеспечением СУДВ.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана и исследована схема построения входного каскада синхронного усилителя с дифференциальным входом на основе двух инструментальных усилителей и повторителя напряжения, позволяющая увеличить коэффициент ослабления синфазного сигнала до 160 – 180 дБ в диапазоне частот до 100 кГц и обеспечивающая одновременное сравнение двух напряжений до $10\sqrt{2}$ В.
2. Разработан и апробирован синхронный усилитель с дифференциальным входом для метрологического обеспечения измерительных преобразователей, экспериментально проведена процедура оценивания его метрологических характеристик. Созданный синхронный усилитель с дифференциальным входом по своим метрологическим характеристикам превышает зарубежные аналоги и обеспечивает сравнение двух синусоидальных напряжений амплитудой от $10\sqrt{2}$ мкВ до $10\sqrt{2}$ В с разрешающей способностью до 10 нВ в диапазоне частот от 20 Гц до 100 кГц.
3. Разработана и экспериментально проверена процедура измерения на переменном токе модуля и фазового сдвига коэффициента преобразования токовых шунтов на основе созданного синхронного усилителя с дифференциальным входом, позволяющая оценить модуль сопротивления с разрешающей способностью до 10 нОм и фазовый сдвиг с разрешающей способностью до 1°.
4. Разработано специальное программное обеспечение для дистанционного управления и использования в составе автоматизированных измерительных систем созданного синхронного усилителя с дифференциальным входом, позволяющее проводить дистанционную калибровку измерительных преобразователей.
5. Результаты работы применены при создании автоматизированного измерительного комплекса для калибровки и поверки масштабных измерительных преобразователей (индуктивных делителей напряжения), аттенюаторов и магазинов затухания в диапазоне частот 20 Гц – 100 кГц и в диапазоне напряжений 10 мВ – 10 В среднеквадратического значения во Всероссийском Научно-Исследовательском Институте Физико-Технических и Радиотехнических Измерений (ВНИИФТРИ) п. Менделеево, Московская область.
6. Разработанный синхронный усилитель с дифференциальным входом был использован для сличения метрологических характеристик измери-

тельных преобразователей при выполнении госбюджетных НИР по темам: «Прецизионные резистивные и индуктивные преобразователи с улучшенными динамическими характеристиками»; «Программно-аппаратный комплекс для автоматизированных испытаний сильноточных преобразователей»; «Система контроля магнитного окружения квантового процессора на основе феррозондового датчика сверхвысокого разрешения»; «Разработка высокопроизводительного модульного приборного комплекса для автоматизированных систем экспериментальных исследований и управления электрофизическими установками ядерной энергетики».

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Баранов П.Ф., Борилов В.Н. Синхронный усилитель с дифференциальным входом для метрологического обеспечения масштабных измерительных преобразователей // Приборы. – 2013. – №. 4. – С. 8–11.
2. Баранов П.Ф., Борилов В.Н. Синхронные усилители с дифференциальным входом // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 4. – С. 155-159.
3. Бедарева Е.В., Цимбалист Э.И., Муравьев С.В., Баранов П.Ф. Влияние способов подключения потенциальных выводов на динамические характеристики коаксиальных шунтов // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – №. 4. – С. 159–164.
4. Цимбалист Э.И., Баранов П.Ф., Борилов В.Н. Устройство сравнения двух напряжений одной частоты // Датчики и системы. – 2012. – №. 2. – С. 34–36.
5. Баранов П.Ф., Муравьев С.В., Огай В.Е., Учайкин С.В. Феррозондовый магнитометр для измерения магнитной индукции до 1 нТл // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – №. 4. – С. 89–92.
6. Баранов П.Ф., Борилов В.Н. Дистанционная поверка и калибровка средств измерений // Контроль. Диагностика. – 2012. – №. 11. – С. 13–16.
7. Баранов П.Ф., Горисев С.А., Ряшенцев И.В., Царева Е.В., Цимбалист Э.И. FLASH-тренажеры как элемент успешной постановки лабораторного практикума // Открытое образование. – 2012. – №. 5. – С. 30–35.
8. Борилов В.Н., Баранов П.Ф., Цимбалист Э.И., Ким В.Л. Устройство для испытаний и поверки индуктивных делителей напряжения // Контроль. Диагностика. – 2011. - №. 11. – С. 41–45.
9. Борилов В.Н., Баранов П.Ф., Мамаев А.И. Программно-аппаратный комплекс для исследования микроплазменных процессов в растворах // Приборы. – 2011 – №. 12. – С. 53–58
10. Борилов В.Н., Баранов П.Ф. Концепция системы контроля и управления технологическими процессами формирования микроплазменных покрытий // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318. – № 5. – С.120–125.

11. Баранов П.Ф., Бори́ков В.Н., Горисев С.А., Ряшенцев И.В., Цимбалист Э.И. Сетевая виртуальная лаборатория удаленного доступа по электротехнике // Открытое образование. – 2011. – №. 4. – С. 19–24.
12. Бори́ков В.Н., Баранов П.Ф. Дистанционный лабораторный практикум на основе графической программной технологии // Дистанционное и виртуальное обучение. – 2011. – №. 1. – С. 81–88.
13. Баранов П.Ф., Бори́ков В.Н. Уровень современного технического развития синхронных усилителей с дифференциальным входом [Электронный ресурс] // Вестник науки Сибири. – 2013 – №. 1(7). – С. 69–74. – URL: <http://sjs.tpu.ru/journal/article/viewPDFInterstitial/608/460>.
14. Огай В.Е., Баранов П.Ф. Разработка однокомпонентного феррозондового магнитометра // Сборник трудов XVIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (СТТ 2012) в 3-х томах. – Томск, ТПУ, 9–13 апреля 2012. – Томск: Изд. ТПУ. – 2012. – Т. 1. – С. 227–228.
15. Баранов П.Ф. Анализ ослабления синфазного сигнала в инструментальных усилителях // Сборник трудов XIX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (СТТ 2013) в 3-х томах. – Томск, ТПУ, 9–13 апреля 2013. – Томск: Изд. ТПУ. – 2013. – Т. 1. – С. 172–174.
16. Баранов П.Ф., Газетова А.М. Автоматизированный комплекс для испытаний масштабных измерительных преобразователей // Сборник трудов XVII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (СТТ 2012) в 3-х томах. – Томск, ТПУ, 9–13 апреля 2012. – Томск: Изд. ТПУ. – 2012. – Т. 1. – С. 159–160.
17. Baranov P.F., Borikov V.N., Tsimbalist E.I. Lock-in amplifier for calibrating inductive voltage divider // Proceedings of XX IMEKO World Congress, Korea (Республика), September 9–14, 2012. – Budapest, Hungary: IMEKO, 2012 – P. 1–3. – URL: <http://imeko2012.kriss.re.kr>.
18. Баранов П.Ф. Устройство для поверки и калибровки индуктивных делителей напряжения // Сборник трудов XVII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (СТТ 2011) в 3-х томах. – Томск, ТПУ, 18–22 апреля 2011. – Томск: Изд. ТПУ. – 2011. – Т. 1. – С. 233–234.
19. Баранов П.Ф. Информационно-измерительная система для исследования микроплазменных процессов в растворах электролитов // Сборник трудов XVII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (СТТ 2011) в 3-х томах. – Томск, ТПУ, 18–22 апреля 2011. – Томск: Изд. ТПУ. – 2011. – Т. 1. – С. 152–154.
20. Будницкая Ю.Ю., Чубенко А.К., Дорофеева Т.И., Баранов П.Ф. Разработка компьютерной системы измерений параметров процесса микродугового оксидирования // Сборник трудов IX Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых

- «Молодежь и современные информационные технологии» в 2-х томах. – Томск, ТПУ, 11–13 мая 2011 г. – Томск: Изд-во СПБ Графикс. – 2011г. – Т. 2. – С. 276–277.
21. Баранов П.Ф. Синхронный усилитель для поверки и калибровки индуктивных делителей напряжения // Метрологічне забезпечення обліку електричної енергії в Україні, Киев, 1–2 Октября 2011. – Киев: Авега, 2011 – С. 166–173.
 22. Баранов П.Ф. Устройство сравнения двух напряжений с виртуальной панелью управления // Сборник трудов IX Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и современные информационные технологии» в 2-х томах. – Томск, ТПУ, 11–13 мая 2011 г. – Томск: Изд-во СПБ Графикс. – 2011г. – Т. 2. – С. 268–269.
 23. Баранов П.Ф. Компьютерная система автоматизированного исследования электролита при микроплазменном оксидировании // Сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (СТТ 2010) в 3-х томах. – Томск, ТПУ, 12–16 апреля 2010. – Томск: Изд. ТПУ. – 2010. – Т. 1. – С. 163–165.
 24. Баранов П.Ф., Бориков В.Н. Микропроцессорный генератор синусоидальных сигналов с виртуальной панелью управления // Сборник трудов XV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (СТТ 2009) в 3-х томах. – Томск, ТПУ, 4–8 мая 2009. – Томск: Изд. ТПУ. – 2009. – Т. 1. – С. 138–140.
 25. Homyakova M.S., Tarakanov E.V., Baranov P.F. Consensus relation for data fusion in wireless sensor network Modern Technique and Technologies (MTT-2009): Proceedings of the 15th International Scientific and Practical Conference of Students, Post-graduates and Young Scientists – Tomsk, TPU, May 4–8, 2009. – Tomsk: TPU Press, 2009. – P. 44–46.
 26. Baranov P.F., Borikov V.N., Bezshlyakh A.D. Virtual Measurement System of Electric Parameters of Microplasma Processes // SIBCON-2009: Proceedings. – Tomsk, March 27–28, 2009. – Tomsk: The Tomsk IEEE Chapter & Student Branch, 2009. – P. 275–279.
 27. Баранов П.Ф. Измерение электропроводности электролита на базе модульной измерительной системы стандарта PXI фирмы NATIONAL INSTRUMENTS // Сборник трудов XIV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (СТТ 2008) в 3-х томах. – Томск, ТПУ, 24–28 марта 2008. – Томск: Изд. ТПУ. – 2008. – Т. 1. – С. 131–132.
 28. Баранов П.Ф. Компьютерная система измерения электропроводности электролита // Сборник трудов Седьмой Международной научно-практической конференции «Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments». – Москва, 28-29 ноября 2008. – Москва: РУДН, 2008. – С. 103–104.