

На правах рукописи



БАРАНОВ Виктор Алексеевич

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ
ПАРАМЕТРОВ КОМПЛЕКСНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ
ГЕТЕРОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ В РАБОЧИХ РЕЖИМАХ**

Специальности:

**2.2.4. Приборы и методы измерения
(электрические и магнитные величины)
(технические науки);**

**2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы
(технические науки)**

**А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук**

ПЕНЗА – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пензенский государственный университет».

Научные консультанты:

Цыпин Борис Вульфович, доктор технических наук, профессор;

Печерская Екатерина Анатольевна, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Боровик Сергей Юрьевич, доктор технических наук, Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук – обособленного подразделения федерального государственного бюджетного учреждения науки Самарского федерального исследовательского центра Российской академии наук, директор (г. Самара);

Нефедьев Алексей Иванович, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет», профессор кафедры «Электротехника» (г. Волгоград);

Селиванова Зоя Михайловна, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет», профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем» (г. Тамбов)

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет» (г. Самара)

Защита диссертации состоится 23 октября 2025 г. в ____ ч на заседании диссертационного совета 24.2.357.01 в ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет» по адресу: 440026, г. Пенза, ул. Красная, 40.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет» и на сайте: https://dissov.pnzgu.ru/ecspertiza/Tehnicheskie_nauki/baranov

Автореферат разослан «_____» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Светлов Анатолий Вильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Придание изделию определенных функциональных свойств в рабочих режимах эксплуатации, таких как механическая и электрическая прочность, коррозионная стойкость, термостойкость, электрическое сопротивление и т.д., сохранение их в процессе эксплуатации – является целью производственных процессов высокотехнологичных отраслей промышленности. Изделия с гомогенной структурой в большинстве случаев не удовлетворяют всей совокупности предъявляемых к ним требований. В связи с этим разрабатываются изделия с гетерогенной структурой, которые обладают функциональными свойствами, недостижимыми при использовании однородных материалов. Гетерогенную структуру имеют изделия с модифицированной поверхностью, изделия из композиционных диэлектрических и магнитных материалов электроники и электротехники, объекты исследования материаловедения, электрохимии, биологии, экологии, медицины.

Полуфабрикат изделия не обладает целевым свойством, его отдельные свойства появляются и исчезают в процессе изготовления, следовательно, контролировать необходимо такое свойство, которое присуще всем изделиям на всех стадиях производства и в процессе эксплуатации, метод измерения которого не требует отбора пробы, остановки производственного процесса, вывода объекта из эксплуатации и для которого известно уравнение связи с целевыми параметрами и характеристиками изделия. Таким свойством является электропроводность на переменном токе. Это свойство присуще всем без исключения изделиям на всех стадиях жизненного цикла.

Измеряемыми величинами, характеризующими электропроводность на переменном токе, являются параметры комплексного сопротивления (ПКС), при этом пассивные электрические величины: емкость, индуктивность, активное сопротивление – рассматриваются как частотнонезависимые ПКС. Особенностью комплексного сопротивления гетерогенных объектов является нелинейность вольт-амперных характеристик, обусловленная возникновением при приложении электрического напряжения, наряду с электронным, ионного и молионного токов, а также существенной зависимостью ПКС от температуры. Это приводит к нарушению принципа суперпозиции, что не позволяет, в отличие от объектов с гомогенной структурой, экстраполировать результаты измерений средствами измерений параметров линейного комплексного сопротивления, на параметры нелинейного комплексного сопротивления гетерогенного объектов в рабочих режимах в ходе процессов производства и эксплуатации. Рабочий режим гетерогенного объекта измерения ПКС характеризуется амплитудой и частотой синусоидального напряжения на объекте и температурой объекта. В связи с этим актуальной проблемой метрологического обеспечения производства и эксплуатации гетерогенных объектов является выбор методов и разработка средств измерений параметров термозависимого нелинейного комплексного сопротивления для определения их функциональных параметров и характеристик.

Состояние проблемы. Разработка средств измерений ПКС ведется рядом отечественных и зарубежных научных школ. Основные научные результаты в этом виде измерений получили отечественные ученые: К. Б. Карандеев, П. П. Орнатский, Г. А. Штамбергер, В. М. Шляндин, К. Л. Куликовский, Э. М. Бромберг, В. Ю. Кнеллер, Е. А. Ломтев, В. Н. Малиновский, А. И. Мартяшин, Э. К. Шахов, В. С. Гутников, В. И. Батищев, Л. П. Боровских, В. С. Мелентьев, А. В. Светлов, Б. Л. Свистунов, А. А. Тюкавин, Б. В. Цыпин, П. П. Чураков; зарубежные ученые D. D. Macdonald, C. Gabrielli, A. Lasia, M. E. Orazem, B. Tribollet, E. Barsoukov, J. Ross Macdonald, V. F. Lvovich.

Измерения ПКС проводятся методами уравнивающего и прямого преобразования, методом формирования и анализа переходных процессов в измерительной схеме, тестовым и генераторным методами, методами импедансометрии и диэлькометрии. На современном этапе исследования в области разработки средств измерений ПКС гетерогенных объектов направлены, в основном, на развитие методов спектральной импедансометрии и спектральной диэлькометрии, которые позволяют определить частотные характеристики ПКС гетерогенного объекта измерения, в том числе, в рабочих режимах, без использования конкретной электрической модели в виде многоэлементной двухполюсной электрической цепи (МДЭЦ), образованной электрическим соединением резисторов, конденсаторов и катушек индуктивности.

К настоящему времени разработано и применяется большое число типов средств измерений ПКС, что обусловлено большим числом ПКС, многочисленностью используемых видов линейной МДЭЦ, разнообразием рабочих режимов. Современные средства измерений позволяют измерять ПКС двух-, трех- и четырехэлементных МДЭЦ. Амплитудно-фазовая частотная характеристика (АФЧХ) линейных МДЭЦ этого типа представляет собой дробно-полиномиальную функцию частоты синусоидального напряжения на объекте измерения. Модели на основе линейных МДЭЦ адекватно отражают комплексное сопротивление только однородных объектов. Амплитудно-фазовая частотная характеристика комплексного сопротивления гетерогенных объектов не описывается дробно-полиномиальной функцией, что вызвало необходимость расширения элементной базы МДЭЦ виртуальными элементами с показателем размерности частоты меньше 1. Виртуальные элементы эффективно используются при математическом моделировании гетерогенных объектов, однако разработке средств измерений параметров виртуальных элементов МДЭЦ препятствует отсутствие физически реализуемых опорных виртуальных элементов.

Нерешенной проблемой являются измерения ПКС и напряжения на гетерогенных объектах, эксплуатируемых в высоковольтных рабочих режимах при питании измерительной схемы от источника напряжения с ненормированными метрологическими характеристиками, в частности, от промышленной электросети.

Функционирование гетерогенных объектов в рабочих режимах в процессе эксплуатации осуществляется в различных условиях, в частности, при изменениях температуры в широком диапазоне. Температура существенно влияет

как на функциональные свойства гетерогенных объектов, так и на их электропроводность. В связи с этим температура объекта в рабочем режиме должна измеряться и ее влияние на функциональные свойства объекта учитываться.

Решение перечисленных проблем требует научного обоснования и развития методов и средств совместных измерений ПКС, напряжения на объекте измерения, температуры объекта и определения путем математической обработки результатов измерений функциональных параметров, частотных и температурных характеристик гетерогенного объекта в рабочих режимах.

Объект исследования – приборы для измерений параметров нелинейного комплексного сопротивления и температуры гетерогенного объекта в рабочих режимах в составе информационно-измерительных и управляющих систем.

Предмет исследования – формирование теоретических основ проектирования и разработка средств измерений параметров термозависимого нелинейного комплексного сопротивления при питании измерительной схемы синусоидальным напряжением с ненормированными метрологическими характеристиками.

Цель работы – формирование и научное обоснование теоретических основ проектирования универсальных измерительных приборов в составе информационно-измерительных систем для измерений параметров термозависимого нелинейного комплексного сопротивления гетерогенных объектов в рабочих режимах.

Задачи исследования:

1 Анализ и систематизация методов и средств измерений параметров комплексного сопротивления в задачах измерений функциональных параметров гетерогенных объектов в рабочих режимах.

2 Разработка структуры процесса измерения параметров гетерогенного объекта в рабочем режиме на основе измерений параметров комплексного сопротивления и влияющих на него физических величин.

3 Разработка структуры и алгоритма функционирования устройства для измерения параметров нелинейного комплексного сопротивления.

4 Разработка структуры и алгоритма функционирования информационно-измерительной системы для измерения параметров нелинейного комплексного сопротивления гетерогенного объекта в рабочих режимах.

5 Метрологический анализ измерительных приборов и информационно-измерительных систем для измерений параметров нелинейного термозависимого комплексного сопротивления.

6 Разработка математического, алгоритмического, информационного, аппаратного обеспечения приборов и информационно-измерительных систем для измерений параметров термозависимого нелинейного комплексного сопротивления.

7 Разработка измерительных приборов и создание новых элементов структуры информационно-измерительных систем для измерений параметров гетерогенных объектов и влияющих на них величин.

Научная новизна результатов исследований:

1 Разработана структура процесса измерения функциональных параметров гетерогенного объекта измерения параметров комплексного сопротивления, отличающаяся тем, что является комбинацией универсального электрического элемента с комплексным сопротивлением и специализированной математической модели в виде совокупности уравнений связи составляющих комплексного сопротивления элемента и искомых параметров гетерогенного объекта, что открывает возможности унификации средств измерений параметров комплексного сопротивления при одновременном расширении их функциональных возможностей и области применения.

2 Предложено комплексное уравнение преобразования параметров нелинейного комплексного сопротивления, отличающееся универсальностью в отношении типа измерительной схемы и измеряемых параметров измерительного сигнала, что позволяет формировать систему уравнений измерения составляющих комплексного сопротивления и напряжения на объекте как совокупность действительных компонентов комплексного уравнения преобразования в соответствии с условиями конкретной задачи измерения параметров нелинейного комплексного сопротивления гетерогенного объекта в рабочих режимах.

3 Разработан способ аналого-цифрового преобразования напряжения, состоящий в формировании группы уровней опорного напряжения и импульсов напряжения с опорной частотой; сравнивают преобразуемое напряжение со всеми уровнями опорного напряжения, отличающийся тем, что регистрируют и нумеруют каждый момент равенства преобразуемого напряжения уровню опорного напряжения; считают количество импульсов опорной частоты от момента равенства преобразуемого напряжения уровню опорного напряжения до момента равенства преобразуемого напряжения другому уровню опорного напряжения; каждое значение кода результата преобразования формируют из номера момента равенства преобразуемого напряжения уровню опорного напряжения с момента начала интервала времени преобразования, номера уровня опорного напряжения, которому равно преобразуемое напряжение в данный момент времени и результата счета импульсов опорной частоты между моментами равенства, что позволяет минимизировать потери информации о форме преобразуемого напряжения в процессе аналого-цифрового преобразования напряжения.

4 Разработан способ измерения составляющих комплексного сопротивления и напряжения на высоковольтном объекте в рабочем режиме, отличающийся последовательной организацией трех состояний измерительной схемы в виде пассивного делителя напряжения, образованного объектом измерения и мерой пассивной электрической величины, за счет изменения модуля комплексного сопротивления меры, измерением напряжения на мере в каждом состоянии измерительной схемы, формированием системы уравнений измерения и ее решением относительно составляющих комплексного сопротивления и напряжения на объекте, что позволяет измерять составляющие

комплексного сопротивления при напряжении на объекте, превышающем допустимое напряжение на мерах пассивных электрических величин.

5 Предложен способ многопараметрического активного измерительного контроля гетерогенного объекта в рабочих условиях, отличающийся установлением предупредительных, контрольных и предельных границ в диапазоне изменения каждой контролируемой величины и вычислением комплексных показателей состояния для каждого поддиапазона на основе результатов измерений всех величин, что позволяет достоверно отнести текущее состояние процесса к одному из четырех возможных видов и эффективно корректировать ход процесса для придания изделию целевых функциональных свойств.

6 Предложен способ измерительного преобразования емкости дифференциального датчика, отличающийся формированием на объекте измерения синусоидального напряжения и вычитанием напряжений, формируемых за примыкающие полупериоды синусоидального напряжения, что позволяет достичь предельной для данного типа преобразователей чувствительности к разности устойчивости результата преобразования к низкочастотному шуму нормального вида и определять частотные характеристики параметров комплексного сопротивления гетерогенных объектов в рабочих режимах.

7 Предложен способ измерения частоты синусоидального напряжения как величины, обратной периоду, отличающийся тем, что время измерения не превышает периода измеряемого напряжения и чувствительность преобразования частоты в код определяется частотой следования импульсов опорной частоты, что обеспечивает высокое быстродействие, минимальную для данного класса преобразователей погрешность измерения частоты и позволяет повысить точность измерения параметров комплексного сопротивления в режиме питания измерительной схемы от источника синусоидального напряжения с ненормированными метрологическими характеристиками.

Практическая значимость результатов исследований. Результаты теоретических исследований нашли практическую реализацию при проектировании средств измерений ПКС и физических величин, влияющих на ПКС гетерогенных объектов:

- разработаны варианты структурной схемы устройства для измерения составляющих комплексного сопротивления (СКС) гетерогенного объекта при синусоидальном напряжении на объекте измерения, амплитуда которого превышает предельное рабочее напряжение мер пассивных электрических величин;

- разработаны высокочувствительные измерительные преобразователи «модуль комплексного сопротивления – напряжение» на основе двухэлектродных и дифференциальных емкостных датчиков физических величин для применения в измерительных приборах и информационно-измерительных системах при измерении параметров комплексного сопротивления методом диэлектрической спектроскопии;

- разработан частотомер синусоидального напряжения с временем измерения частоты как величины, обратной периоду с временем измерения меньше периода измеряемого напряжения, для использования в измеритель-

ных приборах и информационно-измерительных системах с целью повышения точности измерений ПКС при питании измерительной схемы от источника синусоидального напряжения с ненормированными метрологическими характеристиками;

- разработан способ измерения ПКС во время переходных процессов в измерительных схемах с коммутацией опорных элементов на основе метода спектрального оценивания Прони, что позволяет уменьшить время измерения ПКС не менее, чем в два раза;

- разработана методика оценивания систематической составляющей погрешности согласования объекта измерения с пассивной измерительной схемой устройства для измерения ПКС;

- разработан микропроцессорный измеритель-регулятор температуры для использования в составе систем управления производственным процессом и определения температурных зависимостей ПКС гетерогенных объектов;

- разработан канал измерения параметров дыхания на основе диэлькометрического датчика измерительной системы для телемедицинского мониторинга состояния больных социально значимыми заболеваниями.

Реализация результатов исследований:

1 Разработана и внедрена в производство резисторов Р1-74 (завод «Бином», г. Владикавказ) установка высоковольтная измерительная УВИ-1 для измерений сопротивления высоковольтного высокоомного резистора в рабочем режиме (напряжение на резисторе 1–17 кВ) и оценивания коэффициента нелинейности сопротивления. Диапазон измерения сопротивления 22 МОм – 15 ГОм, относительная погрешность измерения сопротивления $\pm 2\%$, диапазон измерения напряжения на резисторе 1–20 кВ, относительная погрешность измерения напряжения $\pm 2\%$.

2 Преобразователь ПКС дифференциального емкостного датчика применен в системе позиционирования луча высокопроизводительного лазерного технологического оборудования: установка лазерной подгонки тонкопленочных резисторов (завод «РИФ», г. Воронеж), установка лазерной маркировки и объемного лазерного синтеза (Центр технологических лазеров АН СССР, г. Шатура).

3 Разработана и внедрена в производство электровакуумных приборов АО «НИИЭМП» (г. Пенза), информационно-измерительная система асинхронного сбора данных о параметрах термических технологических операций на основе универсального термометра – регулятора температуры «МИРТ-1». Термометр – регулятор «МИРТ-1» способен функционировать с термопреобразователями ХА, ХК, ВР-2, ПП и термометром сопротивления ТСП -100 и измерять температуру в их полном рабочем диапазоне с предельно допустимой абсолютной погрешностью $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Откачной участок научно-производственного комплекса по производству вакуумных конденсаторов и коммутационных устройств оснащен разработанными термометрами – регуляторами «МИРТ-1», что позволило снизить технологические потери и повысить качество изделий электронной техники, производимых АО «НИИЭМП».

4 Разработаны быстродействующие вторичные преобразователи для высокоомных емкостных датчиков физических величин с обработкой сигнала методом спектрального оценивания Прони в составе информационно-измерительных комплексов для высокоточных наземных аэрогазодинамических испытаний ракетно-космической техники (ОАО «НИИФИ», г. Пенза).

5 Методика оценивания погрешности согласования применяется в филиале ПАО «Межрегиональная распределительная сетевая компания Волги – «Пензэнерго» при измерениях параметров изоляции высоковольтных вводов 110 кВ трансформатора С-2-Т на подстанции 110/6 кВ «Южная».

6 Способы совместных измерений параметров комплексного сопротивления, частоты и амплитуды синусоидального напряжения на основе пассивной измерительной схемы в виде неуравновешенного моста и методика метрологического анализа совокупных и совместных измерений параметров комплексного сопротивления и влияющих на них физических величин методом статистических испытаний (методом Монте-Карло) внедрены при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в ООО «НПФ «СТЭК» в интересах ОАО «РЖД»:

- макетный образец вторичного преобразователя составляющих комплексного сопротивления на основе неуравновешенного моста использован при сравнительной оценке действительных метрологических характеристик импортных и отечественных емкостных датчиков для определения качества дизельного топлива для тепловозов по значениям параметров комплексного сопротивления;

- методика метрологического анализа результатов совокупных измерений параметров комплексного сопротивления методом статистических испытаний использована в ходе выполнения опытно-конструкторской работы по разработке дизелькометрических датчиков уровня топлива в баке тепловоза в процессе движения.

7 Модель процесса измерения параметров гетерогенного объекта и методика оценивания погрешности согласования внедрены при выполнении проекта «Фундаментальные основы цифрового двойника технологического процесса формирования оксидных покрытий с заданными свойствами методом микродугового оксидирования», рег. № 123091800009-1 (госзадание вузу, при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ).

8 Результаты диссертационной работы используются в образовательном процессе ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет» (г. Пенза):

- методика метрологического анализа результатов совместных и совокупных измерений методом статистических испытаний (методом Монте-Карло) изучается и применяется в ходе практических и лабораторных занятий по дисциплине «Метрологический анализ измерительных систем» образовательной программы магистратуры 12.04.01 «Приборостроение» (магистерская программа «Измерительные информационные технологии»);

- структура сложного измерительного канала интеллектуальной информационно-измерительной системы для измерений составляющих комплексного сопротивления с прямым метрологическим самоконтролем исполь-

зуется в лекционных занятиях по дисциплине «Интеллектуальные информационно-измерительные системы» образовательной программы магистратуры 12.04.01 «Приборостроение» (магистерская программа «Измерительные информационные технологии»).

Положения, выносимые на защиту:

1 Повышение эффективности существующих информационно-измерительных систем для измерения функциональных показателей и определения характеристик гетерогенного объекта в рабочем режиме достигается унификацией средств измерений составляющих нелинейного комплексного сопротивления объекта и влияющих величин (2.2.11, п. 1).

2 Структура процесса измерения параметров гетерогенного объекта в рабочих условиях в виде комбинации пассивного электрического двухполюсника с термозависимым нелинейным комплексным сопротивлением и системы уравнений связи параметров сопротивления и функциональных параметров объекта является научным решением, обеспечивающим повышение качества изделий с гетерогенной структурой, связанным с измерениями времени, частоты синусоидального напряжения, температуры, пассивных электрических величин, переменного напряжения, аналитических и структурно-аналитических величин (2.2.4, п. 1).

3 Универсальное уравнение и структура процесса измерения составляющих комплексного сопротивления объекта измерения и напряжения на нем позволяют разрабатывать измерительные приборы, обеспечивающие повышение эффективности производства и эксплуатации изделий с гетерогенной структурой, качество которых зависит от точности, диапазонности и оперативности измерений параметров нелинейного комплексного сопротивления (2.2.4, п. 2).

4 Унификация средств измерений параметров нелинейного комплексного сопротивления достигается формированием комбинаторно полной базы структурных схем устройства для измерения составляющих комплексного сопротивления и напряжения на объекте измерения с питанием измерительной схемы синусоидальным напряжением на основе пассивных измерительных схем и обеспечивает совершенствование научно-технических показателей метрологического обеспечения производства и эксплуатации изделий с гетерогенной структурой (2.2.4, п. 3).

5 Введение канала измерения составляющих комплексного сопротивления объекта измерения и напряжения на нем расширяет функциональные возможности информационно-измерительных и управляющих систем производства и эксплуатации гетерогенных изделий возможностью осуществлять многопараметрический измерительный контроль функциональных параметров гетерогенного изделия в рабочих условиях (2.2.11, п. 4).

6 Метод статистических испытаний (метод Монте-Карло) является математическим обеспечением информационно-измерительных систем при оценивании трансформации распределений погрешностей прямых измерений составляющих комплексного сопротивления при изменениях формы представления комплексного сопротивления, косвенных измерениях параметров ком-

плексного сопротивления и функциональных параметров гетерогенных объектов (2.2.11, п. 3).

7 Создание новых элементов структуры информационно-измерительных систем с улучшенными метрологическими характеристиками, реализующих предложенные способы аналого-цифрового преобразования напряжения, измерения составляющих комплексного сопротивления и напряжения на объекте, частоты синусоидального напряжения и преобразования параметров емкостного датчика в напряжение, позволяет улучшить технические и эксплуатационные характеристики информационно-измерительных и управляющих систем, применяемых при производстве и эксплуатации гетерогенных объектов (2.2.11, п. 2).

Апробация работы. Основные положения данной работы представлялись на IV Всесоюзной конференции «Электрометрия-88» (Луцк, 1988); Международной конференции «Теория, методы и средства измерения, контроля и диагностики» (Новочеркасск, 2000); IV Всероссийской научно-технической конференции «Методы и средства измерений» (Н. Новгород, 2002); Межрегиональном научно-техническом семинаре «Экологическая безопасность регионов России» (Пенза, 2002); Международном симпозиуме «Надежность и качество» (Пенза, 2002, 2006, 2019, 2021, 2023); Международной конференции «Континуальные алгебраические логики и нейроинформатика в науке и технике» (Ульяновск, 2006); Всероссийской научно-технической конференции МГТУ им. Н. Э. Баумана «Состояние и проблемы измерений» (Москва, 2008, 2010); Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: эффективность, надежность, безопасность» (Томск, 2013); научно-практической конференции «Метрологическое обеспечение измерительных систем» (Пенза, 2007, 2015); Международной научно-технической конференции «Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации» – «Шляндинские чтения» (Пенза, 2008, 2016, 2018, 2019, 2020, 2022, 2023); 24th Conference of Open Innovations Association FRUCT (Moscow, 2019), 20th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), Erlagol (Altai Republic) (Russia, 2019); 8th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO 2019 (Budva, Montenegro, 2019); ICMSIT-2020: Metrological Support of Innovative Technologies (Saint Petersburg – Krasnoyarsk, 2020); 27th Conference of Open Innovations Association FRUCT (Trento, Italy, 2020).

Публикации. По материалам диссертации опубликована 71 печатная работа, в том числе 23 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России, 8 работ в изданиях, индексируемых Scopus или Web of Science, 9 патентов РФ, 3 базы данных. Опубликовано 1 монография и 1 глава в книге.

Структура и краткое содержание диссертации. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы (174 наименования) и 2 приложений. Общий объем диссертации составляет 318 страниц машинописного текста, включая 70 рисунков и 21 таблицу.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, определены цель и задачи исследования, приведены основные положения, выносимые на защиту, сформулированы научная новизна и практическая значимость работы.

Первая глава посвящена выявлению и анализу проблем измерений функциональных параметров и определения характеристик изделий с гетерогенной структурой в рабочих режимах, обоснованию цели и задач исследования.

В соответствии с парадигмой современного материаловедения макросвойства материала определяются его микроструктурой. Отсюда вытекает, что, исследуя одно макросвойство, в частности, электропроводность, можно получать информацию о других макросвойствах объекта.

Электропроводность, как свойство физического объекта, полно описывается комплексным электрическим сопротивлением. Математические модели комплексного сопротивления $\dot{Z}_X$ составляют пары ПКС: активная R_X и реактивная X_X составляющие; модуль z_X и аргумент φ_X ; ортогональные проекции вектора $\dot{Z}_X$ $z_X \cos \varphi$ и $z_X \sin \varphi$; составляющая R_X или X_X комплексного сопротивления $\dot{Z}_X$ и тангенс угла потерь $\operatorname{tg} \delta_X$; составляющая R_X или X_X комплексного сопротивления $\dot{Z}_X$ и добротность Q . Активное сопротивление R , индуктивность L , емкость C , соответственно, резисторов, катушек индуктивности и конденсаторов, соединение которых образует МДЭЦ, также рассматриваются как ПКС.

Задачи, решаемые путем измерений ПКС, можно разделить на четыре группы по типу используемой модели объекта:

- измерения параметров электрорадиоэлементов и электрических устройств;
- измерения физических величин на основе параметрических датчиков;
- измерения параметров физико-химических процессов;
- измерения параметров биоэлектрических и биохимических процессов.

Решение задач двух первых групп основывается на моделировании однородного объекта измерения линейной МДЭЦ с известной структурой. В задачах первой группы ПКС являются искомыми величинами, а в задачах второй группы значение искомой величины находится путем косвенного измерения на основе прямых измерений ПКС. Измерения ПКС однородных объектов основаны на сравнении напряжения на объекте измерения с напряжением на линейном опорном двухполюснике, составленном параллельно-последовательным соединением мер активного сопротивления, электрической емкости и индуктивности.

При решении новых задач третьей и четвертой групп моделирование объекта исследования линейной МДЭЦ не отражает нелинейность комплексного сопротивления гетерогенных объектов. Качественное различие однородных и гетерогенных структур состоит в том, что электропроводность гетерогенных структур характеризуется не только электронной, но также ионной,

молионной и поляризационной проводимостью. В связи с этим при моделировании гетерогенные объекты используются виртуальные элементы (Варбурга, Геришера, постоянной фазы, Гаврильяка – Негами).

Амплитудно-фазовые частотные характеристики виртуальных элементов МДЭЦ представляют собой математические модели участков АЧФХ гетерогенного объекта, описывающих взаимосвязь искомых функциональных параметров объекта, ПКС и частоты синусоидального напряжения на объекте измерения, эффективно используются при математическом моделировании гетерогенных объектов. Однако виртуальные элементы не отражают нелинейность свойств гетерогенных объектов, а физическая реализация опорных виртуальных элементов с нормированными метрологическими характеристиками невозможна.

При исследовании гетерогенных объектов все более широкое применение находят спектральная импедансометрия и спектральная диэлькометрия. Целью применения этих методов исследования является построение диаграммы Найквиста как наиболее информативного обобщения и удобной для исследователя формы представления результатов измерений составляющих комплексного сопротивления в информативном диапазоне частоты синусоидального напряжения на гетерогенном объекте. Это определяет целесообразность принятия СКС как унифицированной формы представления комплексного сопротивления.

По результатам анализа современного состояния измерений функциональных параметров и определения характеристик гетерогенных объектов сформулированы прямая и обратная задачи измерений функциональных параметров термозависимого нелинейного комплексного сопротивления.

Прямая задача: по результатам измерения СКС гетерогенного объекта, напряжения на нем и температуры на информативных частотах определить:

– частотную характеристику $X_x(\omega) = f[R_x(\omega)]$ (диаграмма Найквиста),

где ω – круговая частота при фиксированных значениях амплитуды напряжения U_x на объекте измерения и температуры Θ_x объекта измерения;

– температурную характеристику $X_x(\Theta) = f[R_x(\Theta)]$ при фиксированных значениях напряжения U_x и круговой частоты ω ;

– характеристику нелинейности $X_x(U_x) = f[R_x(U_x)]$ при фиксированных значениях круговой частоты ω и температуры Θ_x .

Обратная задача: вычислить значение целевого функционального параметра гетерогенного объекта на основе его связи с характеристиками СКС.

Для выбора метода измерения СКС при решении прямой задачи проведена систематизация известных методов измерения СКС. Измерение ПКС методами уравнивающего и квазиуравнивающего преобразования требует использования многозначных опорных элементов, регулируемых в процессе преобразования, что определяет низкое быстродействие таких средств измерений. Устройства, реализующие метод уравнивания, имеют относительно высокую точность, поскольку погрешность результата из-

мерения определяется погрешностью формирования комплексного сопротивления опорных элементов измерительной схемы и метрологическими характеристиками устройства сравнения напряжений и не зависит от нестабильности напряжения питания измерительной схемы.

Средства измерений ПКС методом прямого преобразования разрабатываются на основе активных и пассивных измерительных схем как в виде неуравновешенного моста, так и в виде делителя напряжения, в которых в качестве опорных элементов используются однозначные меры пассивных электрических величин. Прямо измеряемыми величинами являются напряжение на элементе измерительной схемы и (или) фазовый сдвиг напряжения на элементе измерительной схемы относительно напряжения питания или напряжения на другом опорном элементе. Средства измерений, реализующие метод прямого преобразования, имеют быстроедействие, достаточное для оперативного измерительного контроля процессов производства гетерогенных изделий, но сравнительно низкую точность, поскольку погрешность результата измерения зависит от погрешностей активных компонентов, погрешностей опорных элементов, погрешностей формирования частоты и амплитуды напряжения питания, погрешностей согласования, погрешностей результатов прямых измерений параметров выходного сигнала измерительной схемы.

Средства измерений, реализующие описанные методы, не позволяют проводить оперативные совместные измерения СКС, напряжения на объекте и его температуры, результаты которых необходимы для определения функциональных характеристик объектов с гетерогенной структурой.

Анализ методов и средств измерений ПКС показал, что измерительной моделью комплексного сопротивления должна быть показательная форма комплексного числа, предполагающая прямые измерения амплитуды или действующего значения синусоидального напряжения и фазового сдвига напряжения на объекте измерения относительно тока.

Потребность ряда отраслей промышленности в оперативном измерительном контроле широкого набора параметров и определения характеристик гетерогенных объектов определяет актуальность формирования теоретических основ проектирования и разработки быстродействующих средств совместных измерений параметров нелинейного комплексного сопротивления и температуры в рабочих режимах.

Во второй главе представлены теоретические основы разработки средств измерений ПКС гетерогенных объектов в рабочих режимах. Проведен синтез комбинированной модели гетерогенного объекта измерения в рабочих режимах. Составлено универсальное уравнение измерения нелинейных ПКС гетерогенного объекта. Разработана структура процесса измерения составляющих нелинейного комплексного сопротивления информационно-измерительной системой на основе комбинированной модели.

Теоретической основой унификации средств измерений функциональных параметров гетерогенного объекта является универсальная комбинированная модель гетерогенного объекта измерения в рабочих режимах, которая

представляет собой комбинацию электрической и математической моделей (рисунок 1). Объект измерения описывается искомыми параметрами A , B , амплитудой U и частотой ω приложенного к нему гармонического напряжения, температурой Θ . Электрическая модель объекта измерения представляет собой пассивный двухполюсный электрический элемент с комплексным сопротивлением $\dot{Z}_X$, являющимся функцией параметров A , B , U , ω , Θ . Измеряемыми параметрами модели являются СКС объекта, амплитуда и частота гармонического напряжения, температура объекта. Другие ПКС, при необходимости, вычисляются путем подстановки результатов измерений в соответствующие уравнения связи с СКС. Это позволяет рассматривать измерения всех ПКС как совокупные и унифицировать аппаратную часть средств измерений ПКС.

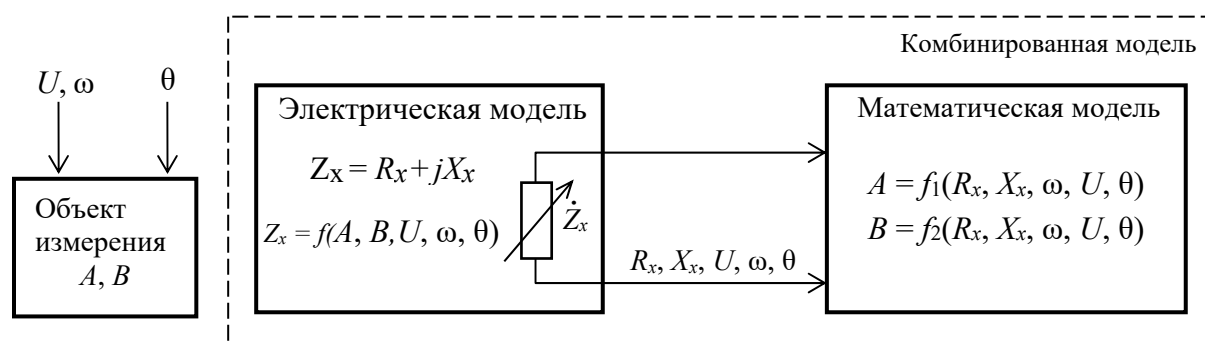


Рисунок 1 – Комбинированная модель гетерогенного объекта измерения в рабочих режимах

Математическая модель объекта представляет собой принятую в данной предметной области специализированную систему уравнений связи искомых параметров A , B , с СКС, частотой и действующим значением синусоидального напряжения на объекте измерения и его температурой. Наблюдаемой характеристикой комплексного сопротивления является АФЧХ.

Метрологический анализ измерений ПКС аналитическим методом затруднен громоздкостью получаемых выражений. В связи с этим предложено проводить метрологический анализ методом статистических испытаний (метод Монте-Карло). Метод Монте-Карло является математическим обеспечением информационно-измерительных систем при оценивании трансформации распределений случайных погрешностей прямых измерений составляющих комплексного сопротивления при изменениях формы представления комплексного сопротивления, косвенных измерениях параметров комплексного сопротивления и функциональных параметров гетерогенных объектов. Типичная погрешность метода Монте-Карло составляет 5–10 %. Такая точность полностью удовлетворяет требованиям надежности оценки неопределенности результатов измерений. Количество реализаций определяется в зависимости от требований к точности измерений и должно быть не менее 10^6 . Метод Монте-Карло позволяет также оценить весовые коэффициенты составляющих

систематической погрешности измерения ПКС по смещению центра распределения оценок погрешности измерения искомого ПКС относительно номинального значения.

Для описания процесса измерения ПКС гетерогенного объекта на основе обобщенного уравнения мостовой цепи К. Б. Карандеева и Г. А. Штамбергера предложено универсальное уравнение измерения параметров термозависимого нелинейного комплексного сопротивления в соответствии с комбинированной моделью гетерогенного объекта.

$$\dot{W} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} = \frac{\dot{a}(\omega_1, \omega_2) \cdot \dot{Z}_X(\omega_1, \Theta_1, U_1) + \dot{b}(\omega_1, \omega_2)}{\dot{c}(\omega_1, \omega_2) \cdot \dot{Z}_X(\omega_2, \Theta_2, U_2) + \dot{d}(\omega_1, \omega_2)}, \quad (1)$$

где $\dot{U}_1 = U_{m1} \sin(\omega_1 t + \varphi_1)$ – синусоидальное напряжение на опорном элементе с амплитудой U_{m1} , частотой ω_1 и фазовым сдвигом φ_1 относительно напряжения питания на элементе измерительной схемы в первом состоянии, $\dot{U}_2 = U_{m2} \sin(\omega_2 t + \varphi_2)$ – синусоидальное напряжение на опорном элементе с амплитудой U_{m2} , частотой ω_2 и фазовым сдвигом φ_2 относительно напряжения питания во втором состоянии измерительной схемы, t – время; Θ_1, Θ_2 – температура объекта измерения при первом и втором состояниях схемы, соответственно, $\dot{a}, \dot{b}, \dot{c}, \dot{d}$ – комплексные коэффициенты, определяемые структурой измерительной схемы и сопротивлением опорных элементов.

Комплексное уравнение решается относительно СКС и напряжения на объекте путем разложения на действительные компоненты «отношение действующих значений напряжений на опорных элементах измерительной схемы», «фазовый сдвиг между напряжениями на опорных элементах» и «отношение действующих значений напряжения на объекте и напряжения питания» и формирования из них системы уравнений измерения в различных сочетаниях. Комбинаторно полная совокупность вариантов системы уравнений измерения является теоретической основой для разработки базовых структур устройств для измерения нелинейных СКС методом прямого преобразования.

Структурная модель процесса измерения параметров нелинейного комплексного сопротивления основано на предложенном Г. П. Шлыковым представлении о процессе измерения физической величины как совокупности операций масштабирования, воспроизведения единицы измерения, сравнения, поиска по шкале и приписывания единицы измерения/

Уравнение измерения модуля комплексного сопротивления имеет вид

$$N_Z = \frac{z_X / 1_Z}{z_0 / 1_Z}, \quad (2)$$

где z_X – модуль измеряемого комплексного сопротивления $\dot{Z}_X$; z_0 – модуль опорного комплексного сопротивления $\dot{Z}_0$; 1_Z – единица измерения комплексного сопротивления, Ом.

Единица 1_Z комплексного сопротивления может воспроизводиться в одной из трех форм: $1_{ZR}[\text{Ом}] = 1_{ZC}[\text{Гц}^{-1} \cdot \Phi^{-1}] = 1_{ZL}[\text{Гц} \cdot \text{Гн}]$, производных от соответствующей единицы измерения электрического сопротивления R , емкости C и индуктивности L . Размерность указывает, мера какой пассивной электрической величины используется для воспроизведения единицы измерения комплексного сопротивления.

Математическая модель измерения параметров комплексной величины в показательной форме представляет собой систему уравнений, которая решается относительно значений СКС:

$$\begin{cases} \sqrt{N_R + N_X} = N_Z, \\ \frac{N_X}{N_R} = \text{tg} N_\varphi, \end{cases} \quad (3)$$

где N_R – значение активной составляющей комплексного сопротивления; N_X – значение реактивной составляющей комплексного сопротивления; N_Z – значение модуля комплексного сопротивления; N_φ – значение фазового сдвига комплексного сопротивления.

Структурная модель процесса преобразования выходных напряжений измерительной схемы в составляющие комплексного сопротивления и частоту синусоидального напряжения, приложенного к объекту измерения, представлена на рисунке 2.

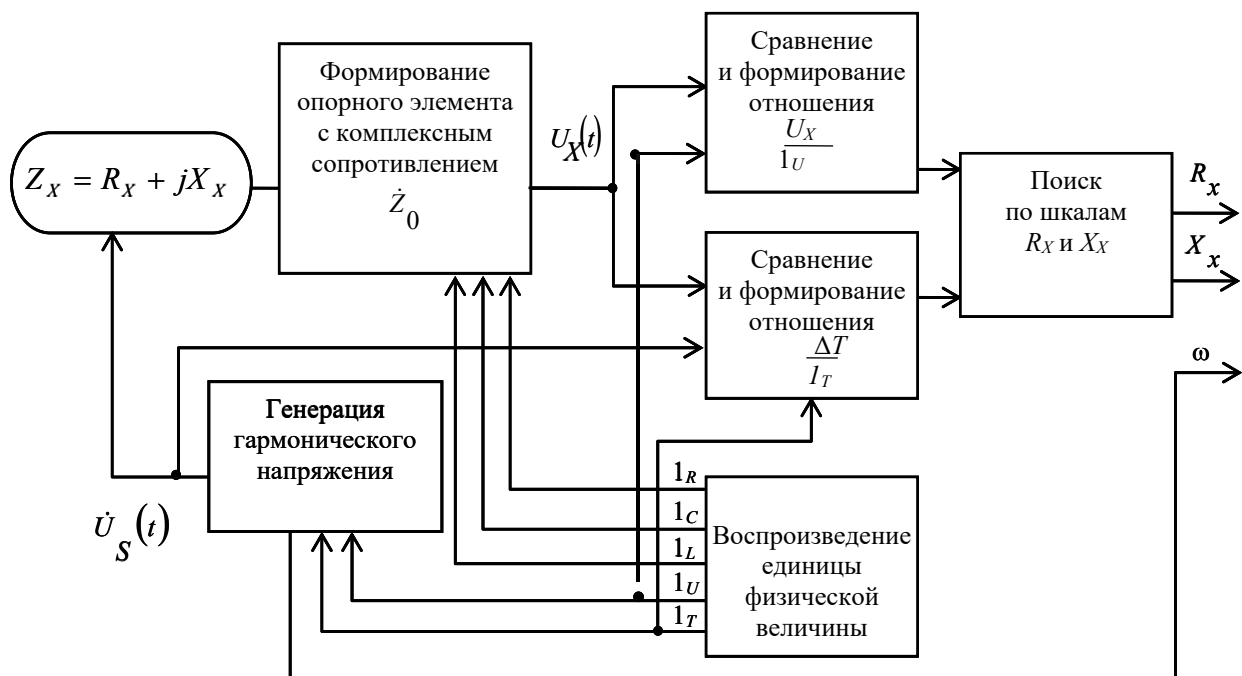


Рисунок 2 – Структурная модель процесса преобразования выходных напряжений измерительной схемы в составляющие комплексного сопротивления и частоту синусоидального напряжения, приложенного к объекту измерения

Объект измерения с комплексным сопротивлением $\dot{Z}_X$ и опорные элементы с комплексными сопротивлениями $\dot{Z}_{0n}$ ($n = 1, 2, \dots$ – число опорных элементов) образуют измерительную схему. Синусоидальное напряжение питания измерительной схемы $U_S(t)$ формируется на основе воспроизведения единиц напряжения 1_U и времени 1_T . На выходе измерительной схемы формируется сигнал $\dot{U}_X(t)$, информативными параметрами которого являются амплитуда напряжения U_{Xm} на опорном элементе и (или) временной сдвиг ΔT_X напряжений на опорных элементах. Над сигналом $\dot{U}_X(t)$ выполняются операции сравнения с единицами 1_U и времени 1_T и формирования, соответственно, отношений $U_{Xm}/1_U$ и $\Delta T_X/1_T$. Отношение $\Delta T_X/1_T$ используется для вычисления значения фазового сдвига $\varphi_X = \omega \Delta T$ напряжений. Для нахождения значений СКС выполняется операция поиска по шкалам R_X и X_X путем преобразования комплексного обобщенного уравнения в систему уравнений действительного переменного и решения этой системы уравнений.

В третьей главе сформирована совокупность базовых схем устройства для измерения СКС комплексного сопротивления и напряжения на объекте на основе делителя напряжения и неуравновешенной мостовой схемы методом прямого преобразования, даны рекомендации по выбору оптимальной структурной схемы в конкретном рабочем режиме.

Систематизация возможных структур процесса совместных измерений СКС и напряжения на объекте измерения представлена на рисунке 3.

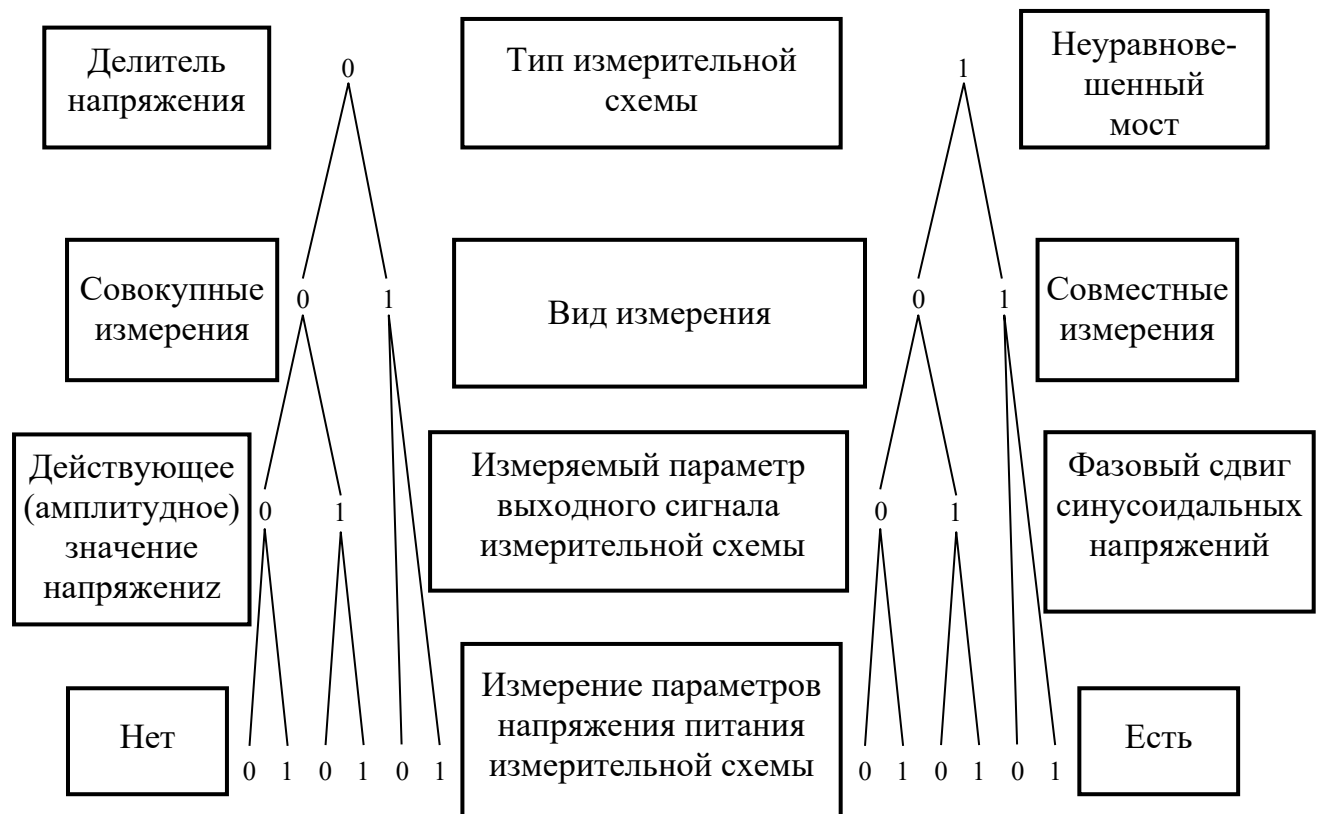


Рисунок 3 – Систематизация структур процесса совместных измерений СКС и напряжения на объекте измерения

Первым признаком ветвления является тип измерительной схемы: не-уравновешенный мост или делитель напряжения. Вторым признаком ветвления – вид измеряемого параметра выходного сигнала измерительной схемы. Возможно прямое измерение обоих параметров выходного сигнала (действующее или амплитудное значение напряжения на опорном элементе, фазовый сдвиг напряжений на опорных элементах) или только одного из этих параметров.

Структуры процесса измерения СКС с прямым измерением обоих информативных параметров выходного сигнала измерительной схемы (01), (11) позволяют осуществлять совместные измерения СКС объекта и информативных параметров синусоидального напряжения на объекте: действующее (амплитудное) значение напряжения, фазовый сдвиг относительно напряжения питания измерительной схемы.

Возможности измерения параметров напряжения на объекте измерения при реализации способов измерения с прямым измерением одной величины (00) ограничены только однородной ей величиной. Если прямо измеряемой величиной является напряжение (001), то возможны совместные измерения СКС и действующего значения напряжения питания (0001), а если прямо измеряемой величиной является фазовый сдвиг (0011) – совместные измерения СКС и частоты напряжения.

Ветвления графа формируют комбинаторно полную базу структур устройств для совместных измерений СКС и напряжения на объекте из шести структур. Базовые структуры устройств и системы уравнений преобразования на основе мостовой измерительной схемы и делителя напряжения представлены в таблицах 1 и 2, соответственно. В структурные схемы на основе делителя напряжения с прямым измерением фазового сдвига напряжений (01) и (001) введен источник синусоидального напряжения, частота которого равна частоте напряжения питания измерительной схемы.

В схемах на основе делителя напряжения с прямым измерением фазового сдвига (011), (0011) введен трансформатор напряжения питания для формирования на входе АЦПФ синусоидального напряжения с начальной фазой.

Устройство для измерений СКС R_X и X_X нелинейного комплексного сопротивления $\dot{Z}_X$ с прямым измерением двух параметров сигнала на основе мостовой измерительной схемы с одним состоянием (111) выполняет измерение путем АЦ – преобразования напряжений на опорных элементах с сопротивлениями $\dot{Z}_0 = R_0 + jX_0$, $\dot{Z}_2 = R_2 + jX_2$ и фазового сдвига φ между этими напряжениями. Блоком вычислений БВ вычисляется отношение результатов АЦ – преобразования напряжений, что позволяет исключить влияние не-стабильности амплитуды напряжения питания измерительной схемы на результат измерения. Значения СКС вычисляются блоком БВ как решения системы уравнений преобразования модуля W и аргумента φ комплексного отношения напряжений $\dot{W}$ в средних точках делителей напряжения. Достоинством данной структуры является отсутствие в измерительной схеме комму-

тационных элементов, что определяет высокое быстродействие средства измерений СКС, построенного по этой схеме.

Таблица 1 – Структуры устройств на основе мостовой измерительной схемы

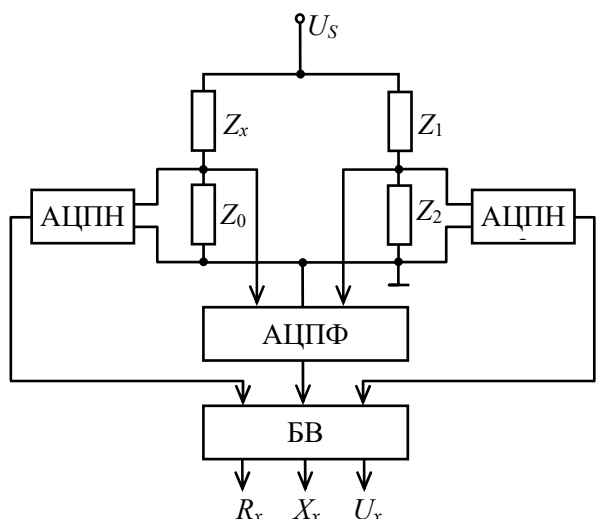
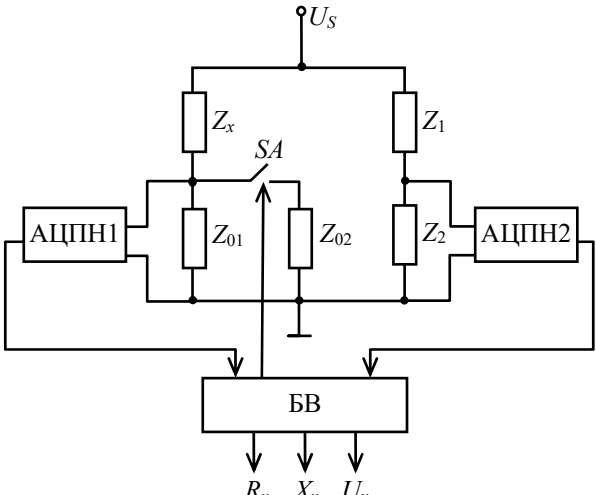
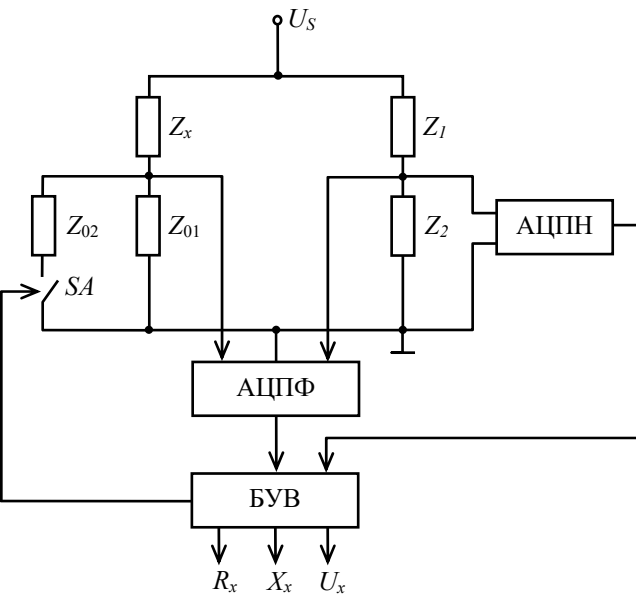
	Код	Структура устройства	Система уравнений измерения
1	111		$\begin{cases} \dot{W} = \frac{(R_2^2 + X_2^2) \cdot [(R_0 + R_X)^2 + (X_0 + X_X)^2]}{(X_0^2 + R_0^2) \cdot [(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2]}, \\ \varphi = \arctg \left(\frac{A_1 + B_1 \cdot R_X + C_1 \cdot X_X}{A_2 + B_2 \cdot R_X + C_2 \cdot X_X} \right), \\ U_X = U_2 \left(1 + \frac{Z_1}{Z_2} \right) - U_0 \end{cases}$
2	1001		$\begin{cases} \frac{U_{01}^2}{U_2^2} = \frac{(R_2^2 + X_2^2) \cdot [(R_{01} + R_X)^2 + (X_{01} + X_X)^2]}{(X_{01}^2 + R_{01}^2) \cdot [(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2]}, \\ \frac{U_{02}^2}{U_2^2} = \frac{(R_2^2 + X_2^2) \cdot [(R_{02} + R_X)^2 + (X_{02} + X_X)^2]}{(X_{02}^2 + R_{02}^2) \cdot [(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2]}, \\ U_X = U_2 \left(1 + \frac{Z_{01}}{Z_2} \right) - U_{01} \end{cases}$
3	1011		$\begin{cases} \varphi_1 = \arctg \frac{A_1 + B_1 R_X + C_1 X_X}{A_2 + B_2 R_X + C_2 X_X}, \\ \varphi_2 = \arctg \frac{A_3 + B_3 R_X + C_3 X_X}{A_4 + B_4 R_X + C_4 X_X} \end{cases}$

Таблица 2 – Структуры устройств на основе делителя напряжения

Код	Структура устройства	Система уравнений измерения
1 011		$\left\{ \begin{aligned} \frac{U_{01}^2}{U_{02}^2} &= \frac{Z_{01}^2 \left[(R_X + R_{02})^2 + (X_X + X_{02})^2 \right]}{Z_{02}^2 \left[(R_X + R_{01})^2 + (X_X + X_{01})^2 \right]}, \\ \varphi_1 - \varphi_2 &= \arctg \left(\frac{X_{01}R_X - R_{01}X_X}{Z_{01}^2 + R_X R_{01} + X_X X_{01}} \right) - \\ &\quad - \arctg \left(\frac{X_{02}R_X - R_{02}X_X}{Z_{02}^2 + R_X R_{02} + X_X X_{02}} \right) \end{aligned} \right.$
2 0001		$\left\{ \begin{aligned} \frac{U_{01}^2}{U_{02}^2} &= \frac{Z_{01}^2 \left[(R_X + R_{02})^2 + (X_X + X_{02})^2 \right]}{Z_{02}^2 \left[(R_X + R_{01})^2 + (X_X + X_{01})^2 \right]}, \\ \frac{U_{01}^2}{U_{03}^2} &= \frac{Z_{01}^2 \left[(R_X + R_{03})^2 + (X_X + X_{03})^2 \right]}{Z_{03}^2 \left[(R_X + R_{01})^2 + (X_X + X_{01})^2 \right]} \end{aligned} \right.$
3 0011		$\left\{ \begin{aligned} \varphi_1 - \varphi_2 &= \arctg \frac{X_{01}R_X - R_{01}X_X}{R_{01}(R_{01} + R_X) + X_{01}(X_{01} + X_X)} - \\ &\quad - \arctg \frac{X_{02}R_X - R_{02}X_X}{R_{02} \cdot (R_{02} + R_X) + X_{02} \cdot (X_{02} + X_X)}, \\ \varphi_1 - \varphi_3 &= \arctg \frac{X_{01}R_X - R_{01}X_X}{R_{01} \cdot (R_{01} + R_X) + X_{01} \cdot (X_{01} + X_X)} - \\ &\quad - \arctg \frac{X_{03}R_X - R_{03}X_X}{R_{03} \cdot (R_{03} + R_X) + X_{03} \cdot (X_{03} + X_X)} \end{aligned} \right.$

Применимость мостовой схемы в средствах измерений ПКС высоковольтных объектов ограничивается допустимым напряжением на опорном элементе, противолежащем объекту измерения.

Структуры средств измерений СКС на основе измерительной схемы в виде делителя напряжения (см. таблицу 2) имеют два (011) или три (0001, 0011) состояния, т.е. на одно состояние больше, чем соответствующая мостовая схема. Основной проблемой использования схем на основе делителя напряжения с прямым измерением фазового сдвига (011, 0011) является отсутствие в измерительной схеме второй точки для подключения АЦПФ.

Для организации второй точки в структуру введен трансформатор напряжения ТН. При измерении фазового сдвига напряжений трансформатор ТН является источником синусоидального напряжения с начальной фазой. При необходимости измерения частоты напряжения питания в структуру вводится частотомер Ч (рисунок 4).

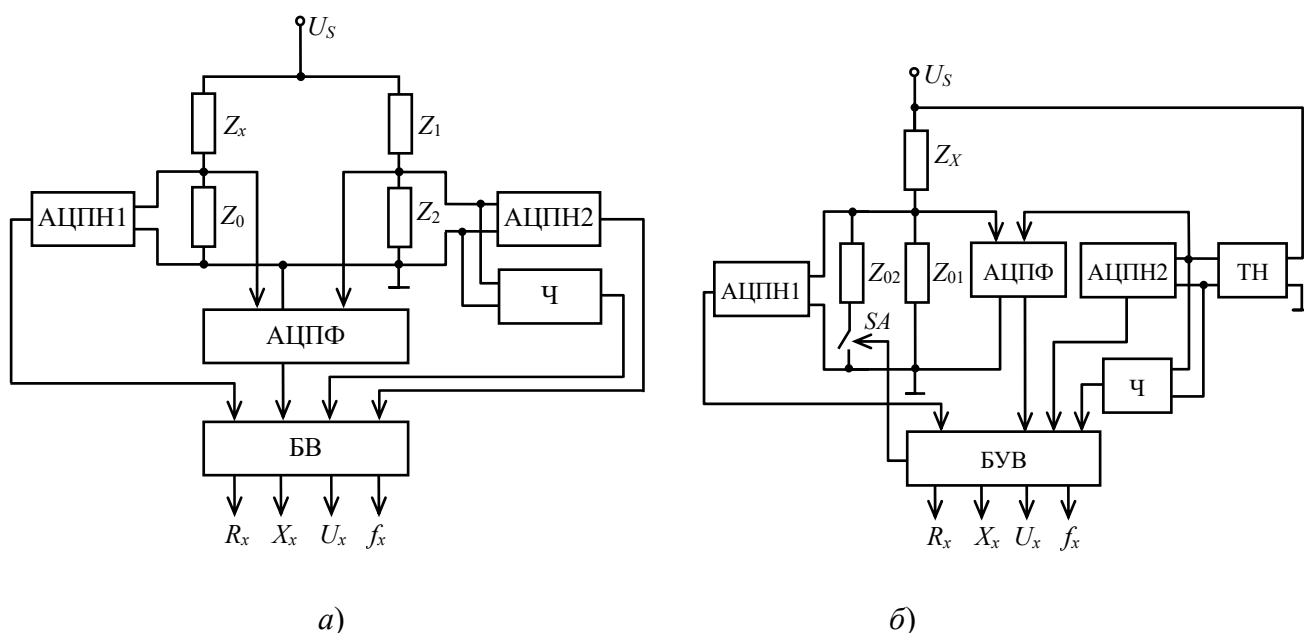


Рисунок 4 – Структурные схемы устройства для измерения СКС и напряжения на основе мостовой схемы (а) и делителя напряжения (б) при питании от источника с ненормированными метрологическими характеристиками

Измерение СКС и напряжения на объекте на основе делителя напряжения и измерения напряжения на опорном элементе (0001) осуществляется путем последовательной организации трех состояний измерительной схемы коммутациями опорных элементов $\dot{Z}_{01}$, $\dot{Z}_{02}$, $\dot{Z}_{03}$, прямого измерения напряжения на опорном элементе в каждом состоянии схемы, нахождения искомых величин по результатам прямых измерений.

Структуры устройств для измерений нелинейных СКС на основе мостовой схемы целесообразно применять при высоких требованиях к быстродействию, поскольку при этой структуре требуется меньшее число состояний по сравнению с измерительной схемой в виде делителя напряжения. Структуры устройств для измерений нелинейных СКС на основе делителя напряжения не имеют альтернатив, если напряжение на объекте превышает допустимое напряжение на опорном элементе мостовой схемы, противолежащем объекту измерений. Применение структур на основе делителя напряжения от-

крывает возможность перехода от системы технического обслуживания электроизоляционных конструкций высоковольтных электрических сетей по наработке к системе технического обслуживания по состоянию.

Измерения нелинейных СКС объекта измерения измерительным устройством со структурой из базовой совокупности выполняются с основной погрешностью, имеющей три инструментальные составляющие: погрешность воспроизведения СКС опорных элементов, погрешность прямых измерений действующего значения напряжения и/или фазового сдвига напряжений и погрешностью согласования выходного сопротивления измерительной схемы и входного сопротивления вольтметра и/или фазометра.

При реализации устройства для измерения СКС на основе пассивных измерительных схем критической составляющей погрешности является погрешность согласования. Погрешность согласования имеет две составляющих: погрешность, обусловленная шунтированием опорного элемента измерительной схемы входным сопротивлением $\dot{Z}_V$ АЦП напряжения и (или) входным сопротивлением $\dot{Z}_\phi$ АЦП фазового сдвига, и погрешность, возникающая при подключении средства измерений к объекту измерения. Отличительной особенностью средств измерений СКС с изменением сопротивления опорного элемента схемы является изменение погрешности согласования в процессе измерения. В связи с этим определение поправки для минимизации систематической составляющей погрешности согласования должно проводиться для каждого состояния измерительной схемы отдельно. Поправка вводится путем подстановки в уравнения преобразования скорректированного значения комплексного сопротивления $\dot{Z}'_{0n}$ опорного элемента. Так, для структурных схем 111 и 011 скорректированное значение $\dot{Z}'_{0n}$ определяется выражением

$$\dot{Z}'_{0n} = \frac{\dot{Z}_{0n}\dot{Z}_\phi\dot{Z}_V}{\dot{Z}_{0n}(\dot{Z}_\phi + \dot{Z}_V) + \dot{Z}_\phi\dot{Z}_V}. \quad (4)$$

Для минимизации второй составляющей систематической погрешности согласования определение параметров входного сопротивления средства измерений СКС осуществляется поочередным включением в измерительную схему вместо объекта измерения двух мер активного сопротивления с сопротивлениями R_{M1} и R_{M2} . Составляемая по результатам прямых измерений напряжения или фазового сдвига напряжений система двух уравнений решается относительно составляющих эквивалентного входного сопротивления.

Четвертая глава посвящена разработке средств измерений ПКС гетерогенных объектов в рабочих режимах с расширенными функциональными возможностями и улучшенными метрологическими характеристиками.

Внедрение в средства измерений средств вычислительной техники позволяет осуществлять сложную обработку измерительной информации непосредственно в процессе измерения. Эффективным методом цифровой обработки результатов измерения ПКС является метод спектрального оценивания

Прони. В качестве компонентов функции регрессии используются синусоидальные и экспоненциальные функции, что соответствует особенностям формирования измерительного сигнала в измерительных устройствах на основе пассивных схем с питанием от источника синусоидального напряжения. Сигнал содержит вынужденную составляющую, формируемую напряжением питания, и экспоненциальные свободные составляющие, обусловленные переходными процессами в измерительной схеме.

В связи с этим метод Прони не только для решения традиционных задач восстановления формы сигнала по дискретным отсчетам и определения его спектральных характеристик, но и для расширения функциональных возможностей средств измерений ПКС гетерогенных объектов в рабочих режимах, в частности, при эксплуатации в высоковольтных электрических цепях. В частности, применение метода Прони позволило повысить достоверность контроля состояния высоковольтных изоляторов под рабочим напряжением по сравнению с применяемым в настоящее время неравновесно-компенсационным методом путем организации измерительного контроля. Совершенствование контроля достигается измерением одной из пар стандартизованных параметров высоковольтного электроизолятора.

Для измерения модуля комплексного сопротивления разработан измерительный преобразователь «модуль комплексного сопротивления – напряжение» для диэлькометрических и емкостных датчиков физических величин, структура которого представлена на рисунке 5.

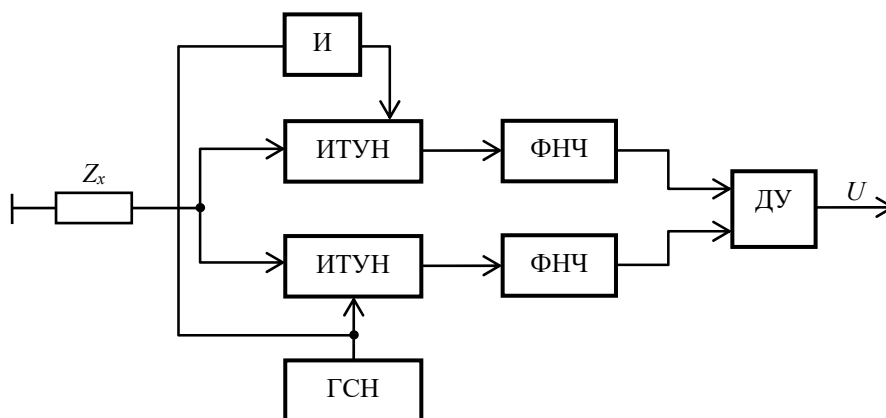


Рисунок 5 – Структура измерительного преобразователя
«модуль комплексного сопротивления – напряжение»

Структуру преобразователя составляют генератор синусоидального напряжения ГСН, инвертор И, источники напряжения, управляемые током ИТУН, фильтры низких частот ФНЧ, дифференциальный усилитель ДУ. Наличие в схеме двух ИТУН обеспечивает синусоидальное напряжение на датчике и позволяет формировать выходное напряжение в течение обоих полупериодов синусоидального напряжения, чем достигается предельная для данного класса преобразователей чувствительность. При реализации на эле-

ментах общего применения основная относительная погрешность преобразования «модуль комплексного сопротивления – напряжение» в диапазоне 1 кОм – 10 МОм не превышает $\pm 0,05\%$.

Для активного контроля термических операций производства вакуумных изделий электронной техники разработан микропроцессорный измеритель – регулятор температуры «МИРТ-1». Прибор предназначен для работы со стандартными термоэлектрическими преобразователями ХА, ХК, ВР, ПП и термопреобразователями сопротивления ТСП. Диапазон измерения температуры определяется рабочим диапазоном датчика. Абсолютная погрешность измерения температуры не более $\pm 2^\circ\text{C}$. Аппроксимация номинальной статической характеристики датчика осуществляется сплайнами 2–3 порядка. Предельная абсолютная погрешность нелинейности стандартных термоэлектрических преобразователей не превышает следующих значений: ХА – $0,20^\circ\text{C}$, ХК – $0,25^\circ\text{C}$, ВР-2 – $0,6^\circ\text{C}$, ПП (S) – $0,8^\circ\text{C}$. Погрешность можно уменьшить за счет увеличения числа участков аппроксимации.

Для измерения частоты синусоидального напряжения при питании измерительной схемы устройства для измерения ПКС от источника с ненормированными метрологическими характеристиками разработан способ измерения частоты на основе интегрирующего преобразования периода в интервал времени. Уравнение измерения частоты имеет вид $N_f = N_0^2 \cdot \frac{f_X}{2f_0}$, где N_f –

результат измерения, N_0 – емкость счетчика формирователя опорного интервала времени, f_X – измеряемая частота, f_0 – опорная частота. При выборе в качестве измеряемой величины длительности полупериода синусоидального напряжения значение частоты для данного периода может быть получено до его окончания. Частотомер, реализующий данный способ измерения, имеет минимальную среди устройств этого типа методическую погрешность, поскольку, в отличие от известных устройств, уравнение измерения не содержит постоянных времени интегрирования.

Разработка структуры 0001 (см. таблицу 2) средства измерений СКС объекта и напряжения на нем позволила впервые корректно решить измерительную задачу, возникшую при производстве фотодатчиков на основе внешнего фотоэффекта. Для измерения сопротивления и относительной нелинейности сопротивления под рабочим напряжением резисторов Р2-74 (сопротивление 15 ГОм и предельным рабочим напряжением до 20 кВ при допустимой относительной нелинейности сопротивления от -20 до $+5\%$) разработана высоковольтная измерительная установка УВИР-1 (рисунок 6).

Установка позволяет проводить совместные измерения сопротивления резистора и напряжения на нем, а также расчет коэффициента нелинейности сопротивления резистора. Технические характеристики установки УВИР-1: диапазон изменения измерительного напряжения постоянного тока – от 1,5 до 20 кВ; диапазон измерения сопротивления – от 20 МОм до 20 ГОм; основная относительная погрешность измерения сопротивления – не более $\pm 1\%$; основная относительная погрешность измерения напряжения – не более $\pm 1\%$.

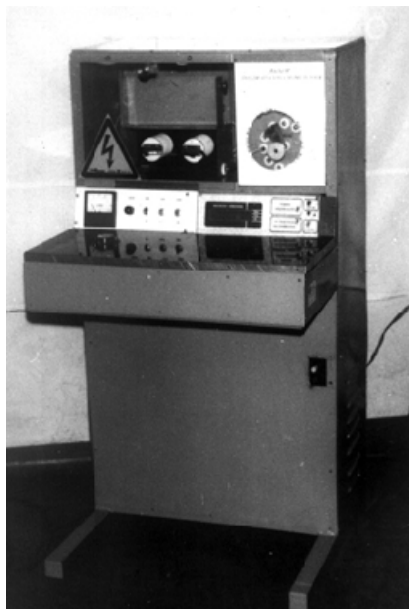


Рисунок 6 – Высоковольтная измерительная установка УВИР-1

Пятая глава посвящена разработке информационно-измерительных и контрольно-измерительных систем для измерений функциональных параметров гетерогенного объекта в рабочих режимах в процессе производства или эксплуатации на основе измерений нелинейных СКС и температуры объекта.

Измерительные задачи, которые решаются с использованием комбинированной модели гетерогенного объекта, требуют разработки унифицированного канала измерения параметров нелинейного комплексного сопротивления информационно-измерительной системы. Унификация измерительных каналов достигается разделением математической модели на компонент, обеспечивающий вычисление СКС, и компонент, обеспечивающий вычисление искомых параметров гетерогенного объекта по значениям СКС и напряжению на объекте. Первый компонент модели реализуется вычислительным устройством канала, что обеспечивает инвариантность выходных величин канала относительно искомых параметров гетерогенного объекта. Программа, реализующая вычисление значений искомых параметров гетерогенного объекта, размещается в вычислительной подсистеме информационно-измерительной или управляющей системы и обращается к базе данных, содержащей уравнения связи функциональных параметров и характеристик гетерогенного объекта с параметрами и характеристиками составляющих нелинейного комплексного сопротивления, напряжения на объекте и его температуры.

Унифицированный канал измерения ПКС информационно-измерительной системы (рисунок 7) состоит из следующих компонентов:

- измерительная схема (ИС канала) в виде делителя напряжения или моста переменного тока, к которой подключается объект измерения с комплексным сопротивлением $\dot{Z}_X$;

- АЦП импеданса АЦПИ, включающий в себя АЦП действующего значения напряжения, АЦП фазового сдвига напряжений на элементах измери-

тельной схемы, цифро-аналоговый преобразователь синусоидального напряжения (ЦАПН) и вычислительное устройство (ВУ АЦПИ), осуществляющее вычисление СКС R_X и X_X , магазин мер пассивных электрических величин, используемый для синтеза измерительной схемы АЦПИ и ИС канала;

– вычислительное устройство канала (ВУ канала), осуществляющее вычисление значений искомых параметров объекта измерения в соответствии с математическим компонентом комбинированной модели по значениям СКС и заданным ВУ канала ИИС частоте и амплитуде синусоидального напряжения на объекте измерения.

АЦПИ функционирует в составе измерительного канала ИИС следующим образом. ВУ канала передает ВУ АЦПИ информацию об амплитуде и частоте напряжения питания измерительной схемы. ВУ задает эти параметры подпрограмме управления ЦАП и формирует сигнал начала генерирования гармонического напряжения. На входы АЦПИ поступает выходное напряжение измерительной схемы. Выходными сигналами АЦПИ являются коды значений СКС и действующего значения напряжения на объекте.

Унификацию АЦП всех измерительных каналов ИИС для измерений ПКС комплексного сопротивления гетерогенных объектов в рабочих режимах предложено осуществлять на основе реализации нового способа аналого-цифрового преобразования напряжения.

Преимуществом предлагаемого способа перед известным является исключение возможности потери информации о изменении преобразуемого напряжения на величину, превышающую разность между уровнями опорного напряжения в течение интервала времени, длительность которого превышает период опорной частоты. В каждый момент равенства преобразуемого напряжения какому-либо уровню опорного напряжения формируется очередное значение кода результата преобразования (рисунок 8). При этом m -е значение кода результата преобразования формируют из номера m момента равенства преобразуемого напряжения уровню U_{0k} опорного напряжения U_0 , номера k уровня U_{0k} опорного напряжения U_0 и результата N_{Xm} счета импульсов опорной частоты f_0 от m -го до $(m + 1)$ -го момента равенства напряжений преобразуемого напряжения уровню U_{0k} опорного напряжения U_0 .

Результат восстановления формы преобразуемого напряжения методом линейной интерполяции представлен пунктирной линией на рисунке 8. Кроме линейной интерполяции, может использоваться интерполяция сплайнами второго и более высоких порядков, а также другими функциями времени.

Другой областью использования результатов аналого-цифрового преобразования напряжения предлагаемым способом является построение гистограммы распределения вероятностей приобретения преобразуемым напряжением значения, принадлежащего одному из интервалов, на которые разделено опорное напряжение в течение времени аналого-цифрового преобразования. Гистограмма позволяет получить непараметрическую оценку распределения плотности вероятности, которая может использоваться при анализе больших объемов данных.

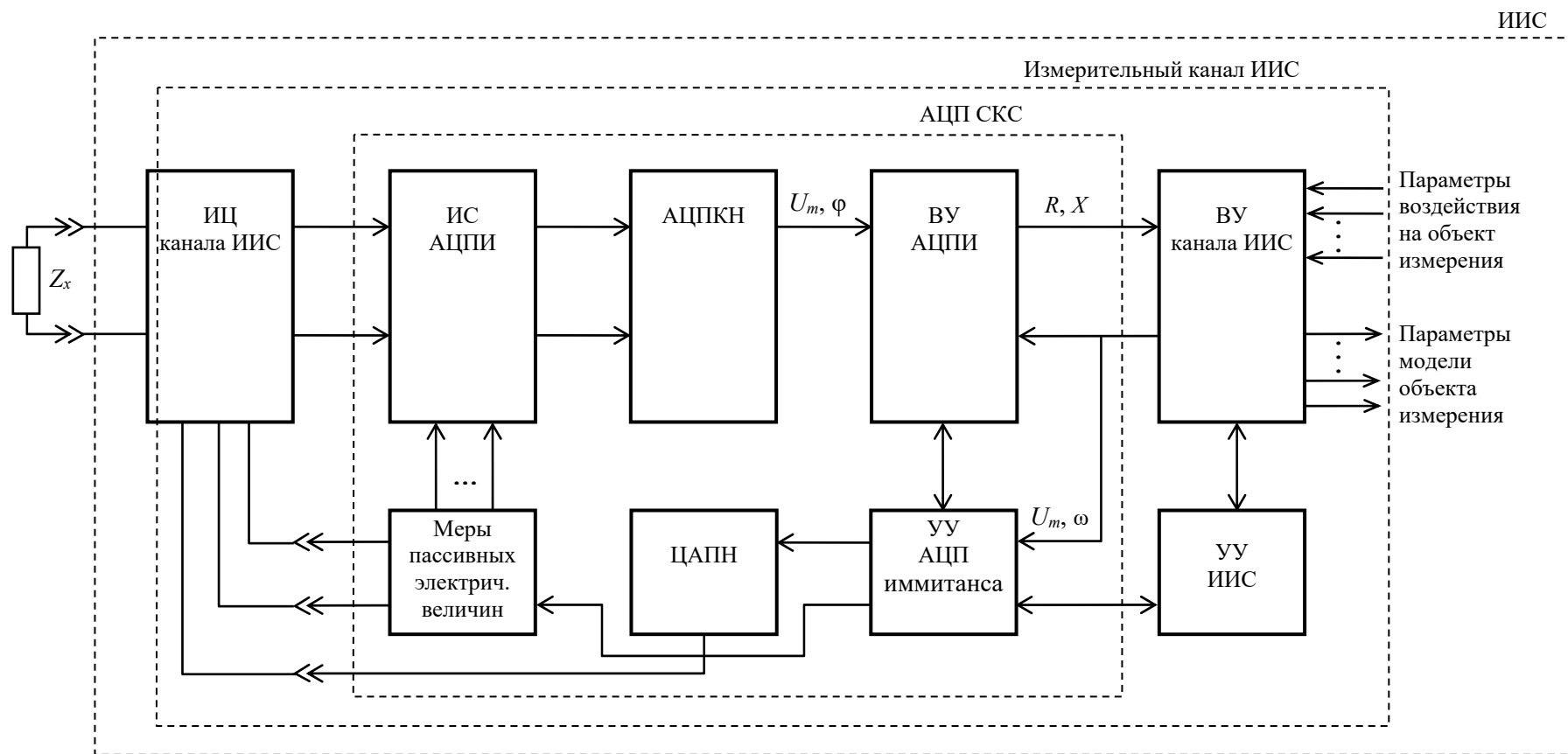


Рисунок 7 – Унифицированный канал измерения ПКС информационно-измерительной системы

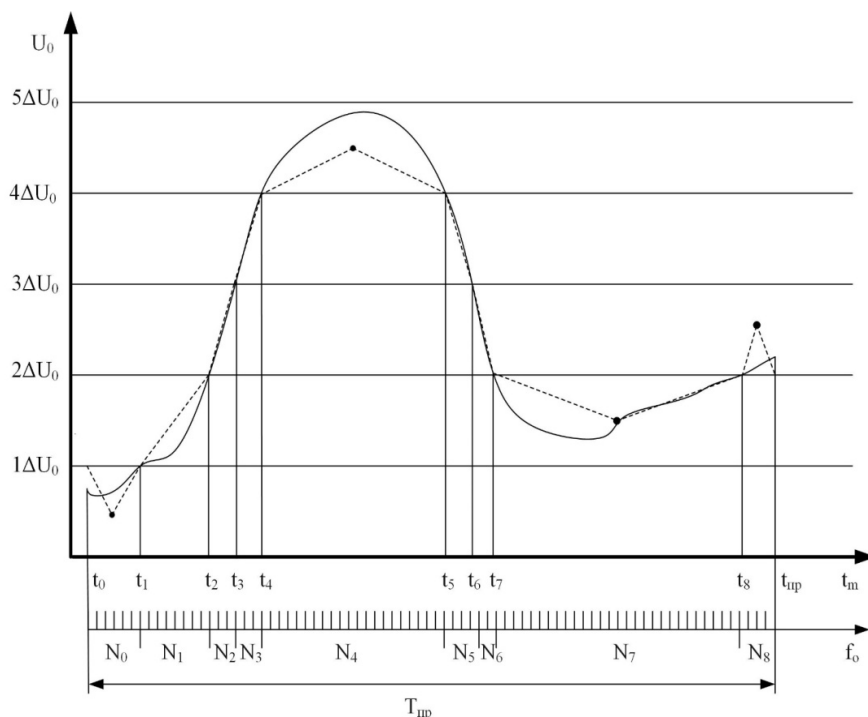


Рисунок 8 – Аналого-цифровое преобразование напряжения и восстановление формы преобразуемого напряжения методом линейной интерполяции

Последовательность значений кода результата аналого-цифрового преобразования сигнала на рисунке 8 приведено в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты аналого-цифрового преобразования сигнала на рисунке 8

Интервал t	$[t_0, t_1]$	$[t_1, t_2]$	$[t_2, t_3]$	$[t_3, t_4]$	$[t_4, t_5]$	$[t_5, t_6]$	$[t_6, t_7]$	$[t_7, t_8]$	$[t_8, t_{\text{пр}}]$
m	0	1	2	3	4	5	6	7	8
k	0	1	2	3	4	4	3	2	2
N_m	6	8	3	3	21	4	2	28	4

Разработка унифицированного канала измерения параметров нелинейного комплексного сопротивления позволяет реализовать в ходе производственного процесса обработки или эксплуатации гетерогенного объекта активный комплексный контроль состояния многопараметрического объекта по разнородной измерительной информации. Управление процессом основано на отношении текущего состояния объекта контроля к одному из качественно различных состояний: нормальное, допустимое, критическое, аварийное. Границами состояний являются предварительно определенные значения частных и комплексных контролируемых показателей. Текущее состояние объекта определяется путем обработки комплекса значений измеряемых параметров объекта и сравнения показателей с границами.

При пооперационном измерительном контроле процесса под нормальным состоянием производственной операции понимается отсутствие необходимости в корректирующем воздействии. Допустимым считается состояние

операции, при котором возврат в нормальное состояние возможен в течение текущей производственной операции при определенных управляющих воздействиях на процесс. Критическое состояние процесса характеризуется тем, что формирование у готового изделия целевых свойств возможно только при воздействиях на процесс при выполнении всех последующих производственных операций. Аварийное состояние процесса определяется невозможностью всеми имеющимися управляющими воздействиями вернуть процесс в нормальное состояние до его окончания. Контроль динамики производственного процесса осуществляется путем циклического повторения всех контрольно-измерительных операций через определенные интервалы времени и сопоставления результатов контроля в соседних циклах.

В шестой главе рассматриваются перспективы дальнейшего совершенствования измерений функциональных параметров гетерогенных объектов в рабочих режимах в интеллектуальных информационно-измерительных и управляющих системах.

Качественно новый этап развития средств измерений ПКС характеризуется их использованием в составе информационных систем с искусственным интеллектом. Проблемы проектирования интеллектуальных ИИиУС обуславливают актуальность дальнейшего развития аксиоматической теории измерений в направлении более строгой формализации физических и виртуальных операций, составляющих измерения физических величин.

На основе известных аксиом измерений сформирована иерархическая система исходных положений проектирования интеллектуальных средств измерений. Систему составляют философский, системно-физический, метрологический и инженерный уровень. Аксиомы трансформированы для интеллектуальных информационных систем на основе принципа конечности (финитности), вытекающего из понимания границы как атрибута системы. Аксиоматический подход дополнен конструктивным введением понятий в теорию проектирования интеллектуальных ИИиУС как частную научную теорию (В. С. Степин). Конструктивно введенными понятиями при проектировании интеллектуальной ИИиУС предлагается считать дискретную модель измеряемой физической величины на основе представления единицы измерения физической величины в виде отношения определяющего числа к самому себе, что исключает необходимость выполнения при измерении операции «Приписывание размерности» и придает информационной системе способность оценивания собственной метрологической исправности.

Принятие этих определений устанавливает обязательность наличия в составе ИИиУС компонентов, обеспечивающих метрологический самоконтроль и использование полученной измерительной информации для адаптации системы к изменениям параметров рабочего режима в направлении расширения функциональных возможностей и улучшения метрологических характеристик. Переход от аналоговой к дискретной модели измеряемой величины обеспечит единство математического обеспечения интеллектуальных ИИиУС. Прогнозируется использование при исследовании свойств гетеро-

генных объектов в рабочих режимах математических моделей на основе гиперкомплексных чисел, что позволит моделировать одновременное влияние на объект до восьми физических величин.

В заключении сформулированы результаты и выводы по работе.

В приложениях приведены документы о внедрении результатов работы в научных исследованиях, промышленности и высшем образовании и объекты интеллектуальной собственности.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1 На основе базового принципа материаловедения сформулирован постулат взаимосвязи электропроводности и функциональных свойств объекта измерения. Проведен анализ объектов и процессов, исследуемых в различных отраслях науки и техники путем измерений параметров комплексного сопротивления с использованием модели в виде линейной многоэлементной двухполюсной электрической цепи. Выявлены ограничения применимости линейной модели при измерениях параметров объектов с гетерогенной структурой. Обоснована актуальность разработки быстродействующих средств измерений составляющих термозависимого нелинейного комплексного сопротивления, способных функционировать в составе систем управления технологическими процессами производства изделий с гетерогенной структурой.

2 Проведены систематизация и анализ методов измерения составляющих комплексного сопротивления в отношении задачи активного измерительного контроля гетерогенного объекта для системы управления технологическим процессом. Обоснована целесообразность разработки средств измерений составляющих комплексного сопротивления методом прямого преобразования на основе пассивных измерительных схем типа неуравновешенного моста и делителя напряжения.

3 Сформированы теоретические основы разработки средств измерений параметров нелинейного комплексного сопротивления гетерогенного объекта, которые составляют следующие компоненты:

- модель объекта измерения параметров нелинейного термозависимого комплексного сопротивления в виде комбинации универсальной электрической модели и специализированной математической модели;

- обобщенное уравнение преобразования составляющих комплексного сопротивления, напряжения на объекте измерения и его температуры в отношении синусоидальных напряжений на опорных элементах измерительной схемы;

- структура процесса измерения составляющих комплексного сопротивления на основе прямых измерений падения напряжения на опорном элементе измерительной схемы и фазового сдвига напряжений в узлах измерительной схемы;

- комбинаторно полная база структурных схем устройства для измерения составляющих нелинейного комплексного сопротивления и напряжения

на объекте измерения с питанием измерительной схемы синусоидальным напряжением на основе пассивных измерительных схем в виде неуравновешенного моста и делителя напряжения.

4 Предложен способ многопараметрического активного измерительного контроля технологического процесса обработки гетерогенного объекта, отличающийся установлением предупредительных, контрольных и предельных границ в диапазоне изменения каждой контролируемой величины и вычислением комплексных показателей состояния для каждого поддиапазона на основе результатов измерений всех величин, что позволяет достоверно отнести текущее состояние процесса к одному из 4 возможных видов и эффективно корректировать ход процесса для придания изделию целевых функциональных свойств.

5 Канал измерения составляющих комплексного сопротивления объекта и напряжения на нем с метрологически значимым программным обеспечением, обеспечивающим формирование вольт-амперных и спектральных характеристик составляющих комплексного сопротивления, является основой проектирования управляющих систем для активного многопараметрического измерительного контроля объектов с гетерогенной структурой в ходе производственного процесса. Использование канала измерения параметров комплексного сопротивления в информационно-измерительной системе амбулаторного мониторинга электрической активности сердца позволило минимизировать влияние изменений комплексного сопротивления торса человека в условиях свободной двигательной активности на форму электрокардиосигнала, что повышает достоверность оценки состояния сердца на основе анализа электрокардиограммы.

6 Метод Монте-Карло позволяет оценивать трансформацию распределений погрешностей прямых измерений составляющих комплексного сопротивления при переходах между формами представления комплексного сопротивления и косвенных измерениях искомых параметров комплексного сопротивления.

7 Применение измерительных устройств, реализующих предложенные способы измерения составляющих комплексного сопротивления и напряжения на объекте, частоты синусоидального напряжения и преобразования параметров емкостного датчика в напряжение, в составе средств измерений параметров нелинейного комплексного сопротивления позволяет улучшить их метрологические характеристики. Измерительный преобразователь «модуль комплексного сопротивления – напряжение» применен в канале измерения параметров дыхания информационно-измерительной системы для телемедицинского мониторинга состояния больных социально значимыми заболеваниями.

8 Результаты теоретических исследований получили практическую реализацию. Разработаны и внедрены в производство резисторов P1-74 (завод «Бином», г. Владикавказ) установки для измерений сопротивления и оценивания коэффициента нелинейности высоковольтных высокоомных резисто-

ров УВИ-1. Измерения производятся при напряжении на объекте измерения, превышающем предельное рабочее напряжение меры сопротивления. Технические характеристики установки УВИ-1: диапазон регулирования измерительного напряжения – 5 – 20 кВ; относительная погрешность установки и поддержания измерительного напряжения не более $\pm 10\%$; диапазон измерения сопротивления – $22 \dots 15 \cdot 10^3$ МОм; диапазон измерения напряжения – 1...20 кВ; относительная погрешность измерения сопротивления не более $\pm 2\%$; относительная погрешность измерения напряжения не более $\pm 2\%$.

9 Преобразователь ПКС дифференциального емкостного датчика в напряжение, электрическая емкость – 30...50 пФ, чувствительность – 1 пФ/В, время преобразования не более 0,1 мс, долговременная нестабильность ± 1 мВ / 8 ч, применен в системе позиционирования луча высокопроизводительного лазерного технологического оборудования: установка лазерной подгонки тонкопленочных резисторов (завод «РИФ», г. Воронеж), установках лазерной маркировки и объемного лазерного синтеза (Центр технологических лазеров АН СССР, г. Шатура).

10 Способы совместных измерений параметров комплексного сопротивления, частоты и амплитуды синусоидального напряжения на основе пассивной измерительной схемы в виде неуравновешенного моста и методика метрологического анализа совокупных и совместных измерений параметров комплексного сопротивления и влияющих на них физических величин методом статистических испытаний (методом Монте-Карло) внедрены при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в ООО «НПФ "СТЭК"» (г. Пенза) в интересах ОАО «РЖД».

11 Разработана и внедрена в производство электровакуумных приборов ОАО «НИИЭМП» (г. Пенза) информационно-измерительная система асинхронного сбора данных о параметрах термических технологических операциях на основе термометра – регулятора температуры «МИРТ-1». Откачной участок научно-производственного комплекса по производству вакуумных конденсаторов и коммутационных устройств оснащен разработанными термометрами – регуляторами «МИРТ-1», что позволило снизить технологические потери и повысить качество продукции.

12 Разработана и внедрена в серийное производство цифрового киловольтметра СКВ-100 с диапазоном измерений напряжений постоянного и переменного тока до 100 кВ в ОАО «НИИЭМП» установка для оценки коэффициента нелинейности элементов высоковольтного высокоомного делителя напряжения.

13 Разработаны быстродействующие вторичные преобразователи для высокоомных емкостных датчиков физических величин с обработкой выходного сигнала методом спектрального оценивания Прони в составе информационно-измерительных комплексов для высокоточных наземных аэрогазодинамических испытаний ракетно-космической техники (ОАО «НИИФИ», г. Пенза). Методика оценивания погрешности согласования применяется в филиале ПАО «Межрегиональная распределительная сетевая компания

Волги» – «Пензэнерго» при измерениях нормируемых параметров изоляции высоковольтных вводов 110 кВ трансформатора С-2-Т на подстанции 110/6 кВ «Южная».

14 Составлен прогноз дальнейшего совершенствования средств измерений параметров комплексного сопротивления для использования в интеллектуальных информационно-измерительных и управляющих системах. Самодиагностика и метрологический самоконтроль станут обязательными режимами функционирования средств измерений. При взаимодействии средств измерений с искусственным интеллектом будет использоваться форма записи значения физической величины, основанная на использовании числа, входящего в определение единицы физической величины.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из перечня ВАК при Минобрнауки России

1 Трофимов, А. А. Интеллектуальная информационно-измерительная система аппарата для непрямого массажа сердца в процессе сердечно-легочной реанимации / А. А. Трофимов, В. А. Баранов, К. А. Ильин, Е. А. Першин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2025. – № 3. – С. 89–96.

2 Печерская, Е. А. Устройства для измерений составляющих нелинейного комплексного сопротивления гетерогенных объектов в рабочих режимах / Е. А. Печерская, В. А. Баранов, М. В. Бержинская, Б. В. Цыпин, А. А. Данилов, К. А. Ильин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2024. – № 1. – С. 101–113.

3 Пушкарева, А. В. Архитектура приложения для анализа и визуализации данных многопараметрического телемедицинского мониторинга / А. В. Пушкарева, В. А. Баранов, А. В. Кузьмин // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2022. – № 3. – С. 168–177.

4 Баранов, В. А. Информационно-управляющая система для активного контроля технологических процессов производства изделий с гетерогенной структурой / В. А. Баранов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2021. – № 3. – С. 20–29.

5 Баранов, В. А. Информационно-измерительная система для телемедицинского мониторинга состояния больного COVID-19 / В. А. Баранов, Е. А. Печерская, М. И. Сафронов, О. А. Тимохин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2021. – № 1. – С. 85–92.

6 Сафронов, М. И. Способ и аппаратно-программные средства анализа биоимпеданса для систем мобильного мониторинга ЭКГ / М. И. Сафронов, А. В. Кузьмин, О. Н. Бодин, В. А. Баранов, О. А. Тимохина, О. Д. Чебан //

Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2020. – № 3. – С. 118–128.

7 Печерская, Е. А. Моделирование взаимосвязей технологических режимов и свойств оксидного покрытия, синтезированного методом спрей-пиролиза / Е. А. Печерская, Т. О. Зинченко, В. В. Антипенко, В. А. Баранов, Ю. А. Вареник, В. С. Александров // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 3. – С. 69–77.

8 Баранов, В. А. Универсальный вторичный преобразователь для систем с параметрическими первичными преобразователями информации / В. А. Баранов,

А. В. Светлов, Е. А. Ломтев, Б. В. Цыпин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2015. – № 3. – С. 86–94

9 Ашанин, В. Н. Аналого-цифровой преобразователь иммитанса для унифицированного канала информационно-измерительных и управляющих систем / В. Н. Ашанин, В. А. Баранов, Е. А. Ломтев, Б. В. Цыпин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2015. – № 4. – С. 96–108.

10 Баранов, В. А. Сертификация алгоритма сжатия–восстановления измерительных сигналов модифицированным методом Прони / В. А. Баранов, А. В. Терехина, Б. В. Цыпин // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2013. – № 1. – С. 41–47.

11 Нефедьев, Д. И. Измерения активных и пассивных электрических величин в высоковольтных электрических сетях / Д. И. Нефедьев, В. А. Баранов // Метрология (Приложение к журналу «Измерительная техника»). – 2013. – № 11. – С. 39–46.

12 Баранов, В. А. Оценивание погрешностей измерений параметров комплексного сопротивления методом Монте-Карло / В. А. Баранов, А. А. Данилов, С. А. Шумарова // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 5. – С. 52.

13 Баранов, В. А. Совершенствование метрологического обеспечения измерений температуры при производстве вакуумных электронных приборов / В. А. Баранов, Вл. А. Баранов, И. А. Кострикина // Датчики и системы. – 2013. – № 1. – С. 43–44.

14 Баранов, В. А. Измерительный контроль высоковольтных изоляторов при обслуживании электрического оборудования по состоянию / В. А. Баранов, М. Г. Мясникова, Б. В. Цыпин // Контроль. Диагностика. – 2012. № 6. – С. 33–38.

15 Баранов, В. А. Измерения нормированных параметров высоковольтных изоляторов под рабочим напряжением / В. А. Баранов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2012. – № 7. – С. 46–50.

16 Баранов, В. А. Оценивание погрешностей согласования при измерениях составляющих комплексного сопротивления высокоомных двухполюсных цепей / В. А. Баранов // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 11 (ч. 6). – С. 1441–1444. URL: <http://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=30816>.

17 Баранов, В. А. Применение метода спектрального оценивания Прони для повышения быстродействия средств измерений параметров комплексного сопротивления высокоомных цепей / В. А. Баранов, М. Г. Мясникова, Б. В. Цыпин, А.Г. Милованов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 4. – С. 49–56.

18 Баранов, В. А. Систематизация способов измерения составляющих комплексного сопротивления по методу решения обобщенного уравнения мостовой цепи / В. А. Баранов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2008. – № 3. – С. 110–120.

19 Баранов, В. А. Системный подход к проектированию средств измерений автоматических технических систем / В. А. Баранов, Ю. М. Крысин // Вопросы радиоэлектроники. Серия ЭВТ. – 2008. – № 5. – С. 25–31.

20 Баранов, В. А. Совершенствование фотодатчиков на основе внешнего фотоэффекта / В. А. Баранов // Датчики и системы. – 2007. – № 4. – С. 30–31.

21 Баранов, В. А. Информационно-измерительная система контроля температуры при термообработке вакуумных электронных компонентов / В. А. Баранов, Е. С. Полякова // Датчики и системы. – 2006. – № 8. – С. 52–54.

22 Солодимова, Г. А. Портативный влагомер мазута / Г. А. Солодимова, В. А. Баранов, Вл. А. Баранов, И. А. Кострикина // Датчики и системы. – 2003. – № 4. – С. 47–48.

23 Андреев, А. Б. Вторичный преобразователь для емкостных датчиков / А. Б. Андреев, В. А. Баранов, В. А. Баранов // Приборы и техника эксперимента. – 1990. – № 6. – С. 89–90. [Andreev, A. B. Secondary Transducer for Capacitive Sensor / A. B. Andreev, V. A. Baranov, Vl. A. Baranov // Instruments and Experimental Techniques. – 1990. – Vol. 33, № 6. – Part 2. – P. 1432]

Публикации в изданиях, индексируемых в базах данных WoS, Scopus

24 Kuzmin, A. Bioimpedance spectroscopy of breast phantoms / A. Kuzmin, V. Baranov // Journal of Electrical Bioimpedance. – 2025. – Vol. 16, № 1. – P. 50–55.

25 Hyper-Numerical Representation of the Pollution Propagation Process in the Territorial Technosphere / V. A. Baranov, O. E. Bezborodova, O. N. Bodin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – Vol. 459 (6). – P. 062068.

26 Impedance measurement: transformation of the probability density function of the results uncertainty / V. A. Baranov, M. G. Myasnikova, E. A. Pecherskaya [et al.] // IOP Conference Series: Metrological Support of Innovative Technologies, Krasnoyarsk, (4 марта 2020 г.) / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. – Krasnoyarsk : Russia: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. – Vol. 1515. – P. 52024.

27 Golubkov, P. E. Measurement of oxide coating thickness in the micro-arc oxidation process / P. E. Golubkov, E. A. Pecherskaya, T. O. Zinchenko, V. A. Baranov, G. V. Kozlov, Y. V. Shepeleva // Journal of Physics : Conference Series. – 2020. – Vol. 1515 (4).

28 Safronov, M. Reducing of Bioimpedance Influence on ECG by Correction Filter in Mobile Heart Monitoring System / M. Safronov, A. Kuzmin, O. Bodin, V. Baranov, O. Timokhina, O. Cheban // Proceedings of the 27th Conference of Open Innovations Association FRUCT (7–9 September 2020, Trento, Italy). – Helsinki, Finland : FRUCT, 2020. – P. 200–206.

29 Artamonov, D. V. Application of a Hyper-Complex Impedance Model for Indirect Measurements of Materials Parameters of Functional Electronics / D. V. Artamonov, V. A. Baranov, E. A. Pecherskaya, A. V. Pushkareva, B. V. Tsypin and A. V. Fimin // 2019 20th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – Erlagol (Altai Republic), Russia, 2019. – P. 760–764.

30 Baranov, V. A. Smart measurement and control system of condition of a local technosphere / V. A. Baranov, O. E. Bezborodova, A. J. Bodin, O. N. Bodin, A. I. Gerasimov // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1399, № 5. – С. 1–6.

31 Safronov, M. Mobile ECG monitoring device with bioimpedance measurement and analysis / M. Safronov, A. Kuzmin, O. Bodin, V. Baranov, A. Trofimov, A. Tychkov // Conference of Open Innovations Association, FRUCT. – 2019. – № 24. – С. 375–380.

Патенты

32 Патент 2835033 С1 Российская Федерация, МПК H03М 1/36. Способ аналого-цифрового преобразования напряжения / Кузьмин А. В., Ильин К. А., Кузнецова О. Ю., Пушкарёва А. В., Баранов В. А. ; заявл. 13.08.2024 ; опубл. 21.02.2025, Бюл. № 6.

33 Патент 2827482 С1 Российская Федерация, МПК А61В 5/352. Способ определения показателей вариативности временных параметров электрокардиографического сигнала / Кузьмин А. В., Гасанова В. А., Пушкарёва А. В., Баранов В. А. ; заявл. 27.10.2023 ; опубл. 27.09.2024, Бюл. № 27.

34 Патент 2719 467 Российская Федерация, СПК G06F 17/10 (2020.01); G06F 11/30 (2020.01). Способ комплексного контроля состояния многопараметрического объекта по разнородной информации / Баранов В. А., Безбородова О. Е., Бодин О. Н., Герасимов А. И., Печерская Е. А., Шерстнев В. В. ; заявл. 11.11.2019 ; опубл. 17.04.2020.

35 Патент 2214609 Российская Федерация, МПК G 01 R27/02. Способ измерения составляющих комплексного сопротивления двухполюсника и напряжения на нем / Андрюшаев А. А., Баранов В. А., Баранов Вл. А., Буц В. П., Недорезов В. Г., Шестернин А. Н. ; заявл. 2001.09.2004 ; опубл. 20.10.2003.

36 Патент 1762253 Российская Федерация, МКИ G 01 R27/26. Способ преобразования емкости дифференциального датчика / Андреев А. Б., Баранов В. А., Баранов Вл. А.; заявл., 21.11.1989 ; опубл. 15.05.1992, Бюл. № 34.

37 Патент 1597762, МКИ G 01 R23/06. Способ измерения частоты / Андреев А. Б., Баранов В. А., Баранов В. А. ; заявл. 05.09.1988 ; опубл. 07.10.1990, Бюл. № 37.

38 Патент 1467519 Российская Федерация. Способ измерения частоты и устройство для его осуществления / Вл. А. Баранов, Н. А. Ермолаев, А. А. Легошин, Г. А. Франк ; заявл. 4.10.1986 ; опубл. 15.11.1988, Бюл. № 11.

39 Патент 1404845 Российская Федерация. Устройство для измерения температуры / Баранов В.А., Ермолаев Н.А., Легошин А.А.; заявл. 22.12.1986 ; опубл. 23.06.1988, Бюл. № 23.

40 Патент 1538062 Российская Федерация, Цифровой термометр / Баранов В. А., Ермолаев Н. А., Легошин А. А. ; заявл. 10.12.1987 ; опубл. 23.01.1990, Бюл. № 3.

Базы данных

41 Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023622630 Российская Федерация. Калибровка устройства для дистанционного мониторинга дыхания методом сличения / Баранов В. А., Бержинская М. В., Фролова А. И., Першин Е. А., Ильин К. А. ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный университет». – № 2023622264 ; заявл. 18.07.2023 ; опубл. 01.08.2023.

42 Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023622512 Российская Федерация. Определение метрологических характеристик диэлькометрического датчика дыхания / Баранов В. А., Бержинская М. В., Фролова А. И. ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный университет». – № 2023622295 ; заявл. 19.07.2023 ; опубл. 25.07.2023.

43 Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2020621594 Российская Федерация. Регрессионные модели взаимосвязей параметров МДО-процесса. Параметры, характеризующие пробой покрытий / Печерская Е. А., Голубков П. Е., Карпанин О. В., Сафронов М. И., Баранов В. А.. – № 2020621429 ; заявл. 16.08.2020; опубл. 31.08.2020.

Публикации в других изданиях

44 Фролова, А. И. Исследование диэлькометрических датчиков устройства для амбулаторного мониторинга внешнего дыхания / А. И. Фролова, В. А. Баранов, О. В. Карпанин [и др.] // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2024. – Т. 2. – С. 286–289.

45 Баранов, В. А. Амбулаторный мониторинг внешнего дыхания диэлектрическим методом / В. А. Баранов, А. И. Фролова, М. В. Бержинская // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2023. – Т. 1. – С. 427–429.

46 Баранов, В. А. Минимизация некардиальной составляющей электрокардиосигнала, обусловленной изменением импеданса кожного покрова / В. А. Баранов, О. Н. Бодин, М. И. Сафронов, О. А. Сафронова // Российский кардиологический журнал. – 2022. – Т. 27, № S6. – С. 20.

47 Баранов, В. А. Базовые структуры устройства для измерения составляющих нелинейного комплексного сопротивления гетерогенных объектов // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации («Шляндинские чтения – 2022») : материалы XIV Междунар. науч.-техн. конф. с элементами науч. школы и конкурсом науч.-иссл. работ для обучающихся и молодых ученых (Пенза, 24–26 октября 2022 г.). – Пенза : Изд-во ПГУ, 2022. С. 31–35.

48 Баранов, В. А. Естественный и искусственный интеллект: проблема обмена измерительной информацией / В. А. Баранов, А. В. Кузьмин, А. В. Пушкарева // Перспективные информационные технологии (ПИТ 2022) : труды Международной научно-технической конференции. – Самара : Самарский научный центр РАН, 2022. – С. 137-141.

49 Баранов, В. А. Метрологические аспекты разработок в области искусственного интеллекта / В. А. Баранов, В. И. Волчихин // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации («Шляндинские чтения – 2020») : материалы XII Международной научно-технической конференции с элементами научной школы и конкурсом научно-исследовательских работ для студентов, аспирантов и молодых ученых / под редакцией Е. А. Печерской. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2020. – С. 80–82

50 Баранов, В. А. Формулирование и решение обратной задачи импедансометрии / В. А. Баранов // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации («Шляндинские чтения – 2019») : материалы XI Международной научно-технической конференции с элементами научной школы и конкурсом научно-исследовательских работ для студентов, аспирантов и молодых ученых / под редакцией Е. А. Печерской. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2019. – С. 216-217.

51 Баранов, В. А. Эволюция модели объекта измерения комплексного сопротивления / В. А. Баранов // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации : материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения В. М. Шляндина. – Пенза, 2018. – С. 171–172

52 Артамонов, П. И. Универсальная модель объекта измерения комплексного сопротивления / П. И. Артамонов, В. А. Баранов // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации «Шляндинские чтения – 2016» : материалы международной научно-

технической конференции. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2016. – С. 38–40.

53 Баранов, В. А. Средства измерительного контроля высоковольтных изоляторов под рабочим напряжением / В. А. Баранов, Д. И. Нефедьев // Метрологическое обеспечение измерительных систем : сборник трудов IX научно-практической конференции. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2015. – С. 56–59.

54 Баранов, В. А. Универсальное уравнение измерения составляющих комплексного сопротивления / В. А. Баранов // Состояние и проблемы измерений : сборник материалов XI всероссийской научно-технической конференции. – Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. – С. 25–27.

55 Баранов, В. А. Разработка электрических моделей для определения значения параметров материалов / В. А. Баранов, И. Р. Добровинский, Е. А. Ломтев // Информационно-измерительная техника : межвузовский сборник научных трудов. – Вып. 34. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2009. – С. 186–193.

56 Баранов, В. А. Числовое представление результата измерения физической величины / В. А. Баранов // Законодательная и прикладная метрология. – 2008. – № 3. – С. 64–65.

57 Баранов, В. А. Представление измерительной информации в автоматических системах / В. А. Баранов // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации : труды Международной научно-технической конференции. – Пенза, 2008. – С. 30–32.

58 Баранов, В. А. Алгебраическая модель результата измерения физической величины / В. А. Баранов // Состояние и проблемы измерений : сборник материалов 10-й Всероссийской научно-технической конференции, МГТУ им. Н. Э. Баумана. – Москва, 2008. – С. 25–27.

59 Крысин, Ю. М. Системный подход к аксиоматике теории измерений / Ю. М. Крысин, В. А. Баранов // Метрологическое обеспечение измерительных систем : сборник докладов 4-й Международной научно-технической конференции / под ред. А. А. Данилова. – Пенза, 2007. С. 30–35.

60 Баранов, В. А. Особенности измерения в технических системах / В. А. Баранов // Мир измерений. – 2007. – № 2. – С. 49–50.

61 Баранов, В. А. Сложность технической системы / В. А. Баранов // Континуальные алгебраические логики и нейроинформатика в науке и технике : труды Международной конференции. – Ульяновск, 2006. – Т. 1. – С. 51.

62 Баранов, В. А. Установка для измерения параметров высоковольтных высокоомных резисторов / В. А. Баранов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2002. – Т. 2 – С. 454–456.

63 Баранов В. А. Особенности разработки средств измерений для экологической диагностики и мониторинга / В. А. Баранов // Экологическая безопасность регионов России : материалы межрегионального научно-технического семинара. – Пенза, 2002. – С. 26–28.

64 Баранов, В. А. Комбинированная модель диэлектрического материала / В. А. Баранов // Методы и средства измерений : материалы IV Всероссий-

ской научно-технической конференции. – Нижний Новгород, 2002. – С. 20.

65 Баранов, В. А. Измерение комплексного сопротивления двухполюсных электрических цепей под высоким переменным напряжением / В. А. Баранов // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации : труды Международной научно-технической конференции. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2002. – С. 66–68.

66 Буц, В. П. Измерение долевого содержания компонентов в газожидкостных смесях / В. П. Буц, В. Г. Недорезов, А. М. Андрюшаев, В. П. Маланин, В. А. Баранов, Вл. А. Баранов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2001. – Т. 1 – С. 391–392.

67 Баранов, В. А. Измерение параметров энергетического оборудования под рабочим напряжением / В. А. Баранов // Информационно-измерительная техника : сб. научн. тр. Межвуз. конф. – Вып. 25. – Пенза, 2000. – С. 156–162.

68 Андрюшаев, А. М. Исключение влияния импедансов приборов при измерении параметров диэлектрических материалов / А. М. Андрюшаев, В. А. Баранов, Р. А. Тулаев, Г. П. Шлыков // Теория, методы и средства измерения, контроля и диагностики : материалы Международной конференции. – Новочеркасск : ЮРГТУ, 2000. – С. 7–8.

69 Баранов, В. А. Прецизионный электронный термометр / В. А. Баранов, Вл. А. Баранов, И. Н. Соболев, П. Т. Харитонов // Электрометрия-88 : IV Всесоюзная конференция. – Луцк, 1988. – Ч. III. – С. 406

Монография, непериодическое издание

70 Баранов, В. А. Измерения параметров композиционных диэлектрических материалов / В. А. Баранов. – Пенза : Инф.-изд. центр ПГУ, 2008. – 124 с.

71 Kuzmin, A. Mobile Heart Monitoring System Prototype / A. Kuzmin, M. Safronov, O. Bodin, V. Baranov // Tools and Technologies for the Development of Cyber-Physical Systems. – Hershey PA (USA): IGI Global, 2020. – P. 153–175.

Научное издание

БАРАНОВ Виктор Алексеевич

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ
ПАРАМЕТРОВ КОМПЛЕКСНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ
ГЕТЕРОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ В РАБОЧИХ РЕЖИМАХ

Специальности:

2.2.4. Приборы и методы измерения
(электрические и магнитные величины)
(технические науки)

2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы
(технические науки)

Редактор Е. В. Дергунова
Технический редактор А. Г. Темникова

Подписано в печать 03.07.2025. Формат 60×84¹/₁₆.
Усл. печ. л. 2,31. Заказ № 255. Тираж 100.

Издательство ПГУ
440026, г. Пенза, ул. Красная, 40
Тел.: (8412) 666-777, 666-049; e-mail: iic@pnzgu.ru