

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



БАРАНОВ Виктор Алексеевич

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

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

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

Д и с с е р т а ц и я
на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научные консультанты:
доктор технических наук, профессор
Цыпин Б.В.,
доктор технических наук, профессор
Печерская Е.А.

Пенза – 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
Глава 1 МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ КОМПЛЕКСНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГЕТЕРОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ	
1.1 Измерения параметров гетерогенных объектов в рабочих режимах.....	19
1.2 Модели, параметры и характеристики нелинейного комплексного электрического сопротивления.....	24
1.3 Методы измерения параметров и определения характеристик комплексного сопротивления.....	39
1.4 Определение цели и задач исследования методов и средств измерений параметров комплексного сопротивления гетерогенных объектов в рабочих режимах.....	49
Выводы по главе 1	56
Глава 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ КОМПЛЕКСНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ В РАБОЧИХ РЕЖИМАХ.....	
2.1 Комбинированная модель гетерогенного объекта измерения в рабочих режимах	60
2.2 Универсальное уравнение измерения параметров комплексного сопротивления гетерогенного объекта в рабочих режимах.....	76
2.3 Разработка структуры процесса измерения составляющих нелинейного комплексного сопротивления	82
Выводы по главе 2	88
Глава 3 ФОРМИРОВАНИЕ СОВОКУПНОСТИ БАЗОВЫХ СТРУКТУР УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ КОМПЛЕКСНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ И НАПРЯЖЕНИЯ НА ОБЪЕКТЕ ИЗМЕРЕНИЯ.....	
3.1 Систематизация структур процесса совместных измерений составляющих комплексного сопротивления и напряжения на объекте измерения.....	90
3.2 Базовые структуры устройства для измерения составляющих комплексного сопротивления и напряжения на объекте измерения	93

3.3 Разработка базовых структур устройства для измерений составляющих комплексного сопротивления и напряжения на объекте на основе мостовой измерительной схемы	97
3.4 Базовые структуры устройства для измерений составляющих комплексного сопротивления и напряжения на объекте на основе измерительной схемы в виде делителя напряжения	105
3.5 Анализ и исследование возможностей уменьшения погрешностей измерения составляющих комплексного сопротивления, обусловленных погрешностями воспроизведения составляющих комплексного сопротивления опорных двухполюсных электрических цепей.....	115
3.6 Методики минимизации погрешностей измерений, обусловленных влиянием входных сопротивлений аналого-цифрового преобразователя напряжения и фазового сдвига, устройствами для измерений составляющих комплексного сопротивления на основе базовых структур.....	121
Выводы по главе 3	127
Глава 4 РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ КОМПЛЕКСНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ С УЛУЧШЕННЫМИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ И МЕТРОЛОГИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ	130
4.1 Применение методов спектрального оценивания при решении задач измерения параметров комплексного сопротивления гетерогенного объекта в рабочих режимах	132
4.2 Повышение достоверности измерительного контроля состояния высоковольтных электроизоляторов под рабочим напряжением	149
4.3 Повышение быстродействия средств измерений параметров комплексного сопротивления высокоомных гетерогенных объектов.....	152
4.4 Разработка вторичных измерительных преобразователей для диэлькометрических датчиков	156
4.5 Разработка устройств для измерения температуры гетерогенных объектов в рабочих режимах.....	163
4.6 Разработка прецизионного быстродействующего частотомера частоты синусоидального напряжения	179
4.7 Измерительная установка для исследования зависимости сопротивления толсто пленочного резистора от напряжения.....	185
Выводы по главе 4.....	192

Глава 5 ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГЕТЕРОГЕННОГО ОБЪЕКТА В РАБОЧИХ РЕЖИМАХ....	194
5.1 Унифицированный канал измерения параметров нелинейного комплексного сопротивления информационно-измерительной системы.....	194
5.2 Разработка способа аналого-цифрового преобразования напряжения в сложных измерительных каналах информационно-измерительных и управляющих систем	201
5.3 Разработка системы измерительного контроля состояния гетерогенного объекта в рабочих режимах	214
Выводы по главе 5	235
ГЛАВА 6 ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШЕГО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ КОМПЛЕКСНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ	237
6.1 Теоретические основы проектирования интеллектуальных средств измерений.....	238
6.2 Исходные положения проектирования интеллектуальных средств измерений.....	242
6.3 Представление измерительной информации в интеллектуальных средствах измерений	255
6.4 Гиперчисловые модели многопараметрических объектов измерения ...	261
Выводы по главе 6	266
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	268
Список литературы	273
Приложение 1 Документы о внедрении результатов работы.....	295
Приложение 2 Объекты интеллектуальной собственности.....	310

ВВЕДЕНИЕ

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. является целью производственных процессов наукоёмких 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 приборостроения, электрохимии, экологии, медицины.

Полуфабрикат изделия не обладает целевым свойством, отдельные свойства изделия 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 проб, остановки производственного процесса, вывода изделия 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 и активное сопротивление рассматриваются как частотнонезависимые ПКС. Особенностями 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 нелинейного комплексного сопротивления для определения их функциональных параметров и характеристик в рабочих режимах.

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 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, а также 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 гомогенных объектов.

АФЧХ комплексного сопротивления гетерогенных объектов не описывается дробно-полиномиальной функцией, что вызвало необходимость расширения элементной базы МДЭЦ виртуальными элементами Варбурга, Геришера, постоянной фазы и другими 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 на функциональные свойства гетерогенных объектов 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 путём 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 напряжения 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 измерительных 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), установках 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 операциях 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 ёмкостных 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 используются 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 позволяет 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 комплексного 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), VIII Международной научно-практической конференции «Отечественная наука в эпоху изменений: постулаты прошлого и теории нового времени» (Екатеринбург, 2015), научно-практическая конференция «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- 2024), 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" (2020 Saint Petersburg – Krasnoyarsk), 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 для публикации материалов диссертационной работы, 8 статей в изданиях, индексируемых в базах данных WoS и Scopus, получено 9 патентов РФ, создано 3 базы данных. Опубликовано 1 монография, 1 глава в книге.

Структура и объем 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.

ГЛАВА 1

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ КОМПЛЕКСНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГЕТЕРОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Глава посвящен выявлению и анализу проблем измерений функциональных параметров и определения характеристик изделий с гетерогенной структурой в рабочих режимах, обоснованию цели и задач исследования. Основные результаты исследований, представленные в данной главе, опубликованы в работах [1–6].

1.1 ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГЕТЕРОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ В РАБОЧИХ РЕЖИМАХ

Придание изделию определенных функциональных свойств в рабочих режимах эксплуатации, таких как механическая и электрическая прочность, коррозионная стойкость, термостойкость, электрическое сопротивление и т.д. является целью производственных процессов наукоемких отраслей промышленности. Достижение высокого качества изделий невозможно без регулирования большого числа разнородных параметров производственного процесса на основе оперативно получаемой измерительной информации о их текущих значениях, т.е. активного измерительного контроля, из-за нестабильности параметров и характеристик сырья, оборудования, изменчивости параметров производственного процесса, показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения и т.д.

На рисунке 1.1 представлена структура процесса производства изделия с заданными функциональными свойствами с активным измерительным контролем [1].

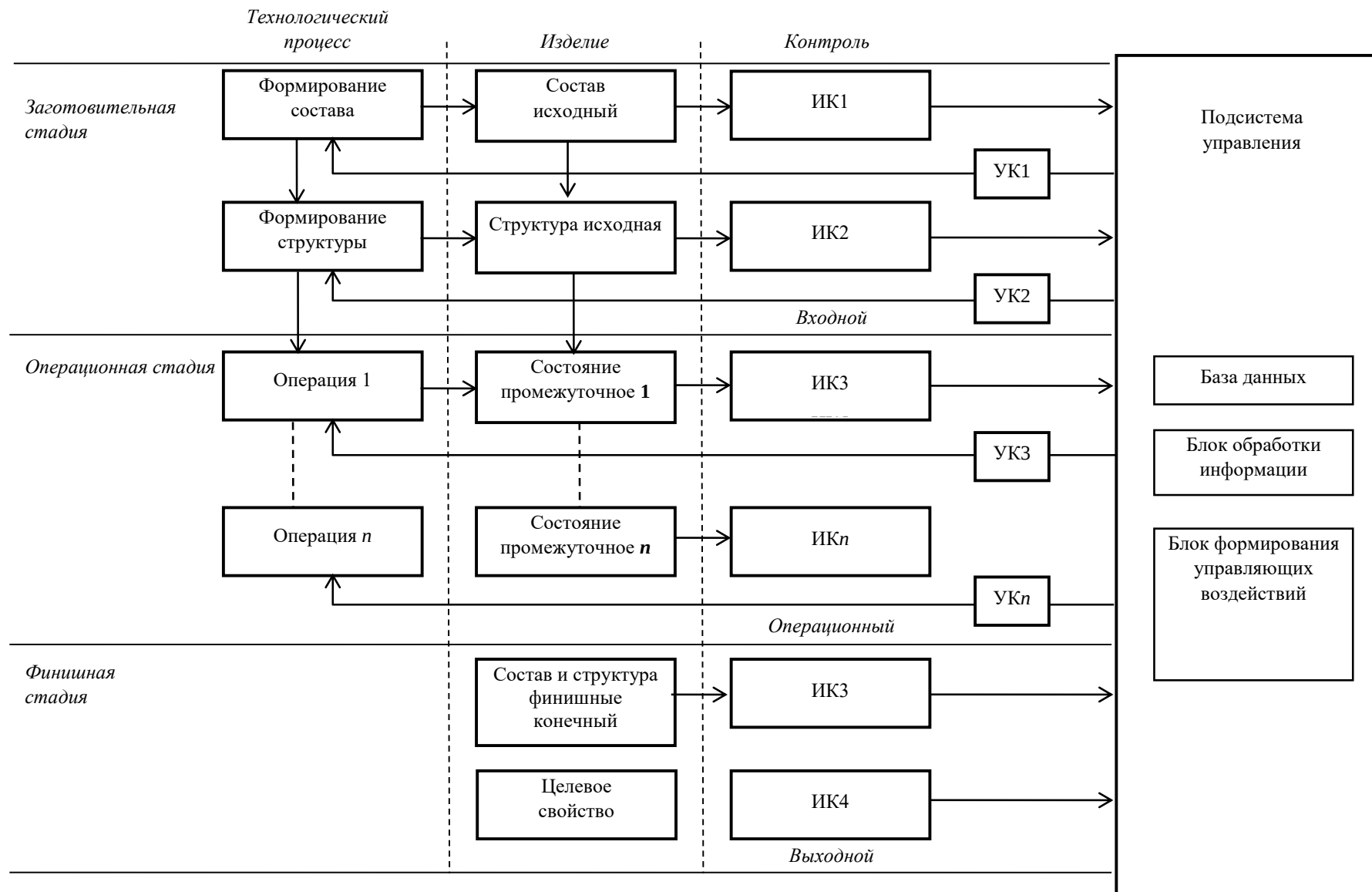


Рисунок 1.1 – Информационно-управляющая система производственного процесса с активным измерительным контролем

Активный контроль обеспечивается введением в состав производственной линии многоконтурной информационно-управляющей системы (ИУС). Каждый контур ИУС управляет проведением соответствующей производственной операции и включает в себя измерительный канал (ИК) и управляющий канал (УК). Объединение контуров в систему достигается подключением всех каналов к подсистеме обработки измерительной информации, которая состоит из блока обработки измерительной информации, блока формирования команд управления и базы данных.

По различных стадиях производственного процесса решаются различные измерительные задачи. На заготовительной стадии формируются исходные состав и структура сырья. Качество применяемых материалов подтверждается сертификатами соответствия, выданными по результатам измерений, выполненных в лабораторных условиях по стандартизованным методикам измерений. В базу данных подсистемы управления заносится информация о номинальных значениях измеряемых параметров, а также математические модели их взаимосвязей с функциональными параметрами изделия. Так, например, база данных [2] содержит информацию о процессе микродугового оксидирования в виде экспоненциальных регрессионных уравнений связи параметров оксидирования и функциональных параметров изделия (твердость, коррозионная стойкость).

На операционной стадии последовательно осуществляются операции, трансформирующие состояние полуфабриката в направлении придания изделию требуемого функционального свойства. Параметры каждой операции и полуфабриката изделия измеряются соответствующим ИК ИУС. Полученная измерительная информация, совместно с информацией, накопленной в базе данных, обрабатывается блоком обработки информации, который вырабатывает команды управления исполнительным устройством ИУ. Исполнительное устройство ИУ оказывает на процесс физическое воздействие, изменяющие параметры процесса до достижения им требуемого состояния.

Задачей измерительного контроля на финишной стадии является оценивание качества изделия путем подтверждения наличия у изделия целевого функционального свойства в степени, соответствующей установленным требованиям. Измерения проводятся по стандартизованным методикам измерений. Стандартизованные методы реализуются относительно дорогостоящим специализированным лабораторным оборудованием в нормальных условиях, измерения часто требуют отбора проб, высокой квалификации оператора и значительного времени.

На операционной стадии невозможно использовать измерительное оборудование, применяемое на заготовительной и финишной стадиях производственного процесса. Поэтому актуальной задачей метрологического обеспечения производства является разработка методов и средств оперативного измерения параметров и определения характеристик полуфабриката изделия в режиме реального времени. Профессор Л.И. Тушинский сформулировал базовый принцип современного материаловедения [7]: от микроструктуры материала к его макросвойствам. Получение требуемого функционального свойства изделия достигается формированием определенной микроструктуры материала. Из данного принципа следует, что все макросвойства изделия взаимосвязаны, поскольку определяются его составом и микроструктурой. Микроструктура и макросвойства связаны через мезоуровень, на котором выделяется конечное счетное число различаемых компонентов структуры изделия. Качество изделия, как наличие требуемых функциональных свойств, достигается формированием в ходе производственного процесса соответствующей структуры материала на основе измерительной информации о параметрах полуфабриката изделия и производственного процесса. Следовательно, разработка информационно-управляющей системы для активного контроля процесса является обязательным этапом проектирования высокоэффективных производств. Изделия с гомогенной структурой во многих случаях 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. Качественное различие гомогенных и гетерогенных структур проявляется в выполнении принципа суперпозиции. По отношению к структуре материала принцип суперпозиции можно сформулировать следующим образом: уравнения, описывающие свойства материала, являются линейными функциями количества мезокомпонентов. Принцип суперпозиции не выполняется для гетерогенных структур, поскольку свойства материала различным образом нелинейно изменяются при изменении количества различных мезокомпонентов.

Полуфабрикат изделия не обладает целевым функциональным свойством, поскольку соответствующая микроструктура еще не сформирована. Следовательно, для управления производственным процессом необходимо контролировать такое свойство изделия, которым оно обладает на всех стадиях процесса и которое функционально связано с целевым свойством. Параметры и характеристики изделия, отражающие это свойство, должны оперативно измеряться непосредственно в ходе производственного процесса. При этом должны быть известны функции связи измеряемых параметров изделия и производственного процесса с физической величиной, отражающей целевое функциональное свойство изделия.

Сформулированным требованиям к контролируемому свойству полностью удовлетворяет электропроводность. Это свойство присуще всем без исключения физическим компонентам процессов производства, испытаний и эксплуатации. Электропроводность описывается пассивными электрическими величинами (емкость, индуктивность, активное сопротивление) и комплексным электрическим сопротивлением.

Выбор параметров комплексного сопротивления в качестве величин, измерение которых позволяет осуществлять измерительный контроль производственного процесса, предъявляет определенные требования к содержимому базы данных системы управления. Для реализации предлагаемого подхода в состав производственного оборудования должны быть

включены средства измерений параметров комплексного сопротивления с соответствующими метрологическими характеристиками. База данных информационно-измерительной или управляющей системы должна содержать математические модели связи регулируемых параметров и характеристик производственной операции с параметрами и характеристиками комплексного сопротивления ее материальных компонентов.

1.2 МОДЕЛИ, ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕЛИНЕЙНОГО КОМПЛЕКСНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Комплексное электрическое сопротивление $\dot{Z}$ пассивной двухполюсной электрической цепи синусоидального переменного тока определяется как отношение переменного напряжения на объекте измерения к протекающему через нее переменному току [8]: Комплексное сопротивление характеризует физические процессы, проходящие в объекте измерения под воздействием приложенного синусоидального напряжения $\dot{U}$:

$$\dot{Z} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{U_m \sin \omega t}{I_m \sin(\omega t + \phi)}, \quad (1.1)$$

где $\dot{U}$ – синусоидальное напряжение с амплитудой U_m , $\dot{I}$ – синусоидальный ток с амплитудой I_m , ω – круговая частота синусоидального напряжения и тока, ϕ – фазовый сдвиг тока $\dot{I}$ относительно приложенного к объекту напряжения $\dot{U}$,
 t – время.

Математической моделью комплексного сопротивления является комплексное число. Комплексное число может быть представлено в алгебраической, тригонометрической и показательной формах [9]. Трех формам комплексного числа соответствуют три модели комплексного

сопротивления, в которых под параметрами модели понимаются физические величины.

Алгебраическая модель комплексного сопротивления:

$$\dot{Z} = R + jX, \quad (1.2)$$

где R – активная составляющая комплексного сопротивления $\dot{Z}$; X – реактивная составляющая комплексного сопротивления $\dot{Z}$; j – мнимая единица.

Тригонометрическая модель комплексного сопротивления:

$$\dot{Z} = z \sin \phi + jz \cos \phi, \quad (1.3)$$

где $z = \sqrt{R^2 + X^2}$ – модуль комплексного сопротивления $\dot{Z}$, $\phi = \arctg X/R$.

Показательная модель комплексного сопротивления:

$$\dot{Z}_X = ze^{j\phi}, \quad (1.4)$$

где e – основание натурального логарифма, $e = 2,71828...$

Модели комплексного сопротивления $\dot{Z}$ составляют пары однородных и неоднородных физических величин и их действительных функций, параметры комплексного сопротивления (ПКС):

- активная R и реактивная X составляющие сопротивления $\dot{Z}$;
- тригонометрические составляющие $z \cos \phi$ и $z \sin \phi$ сопротивления $\dot{Z}$;
- модуль комплексного сопротивления z и фазовый сдвиг ϕ ;
- активная составляющая R или реактивная составляющая X комплексного сопротивления $\dot{Z}$ и тангенс угла фазового сдвига $tg \phi$;
- реактивная составляющая R или X комплексного сопротивления $\dot{Z}$ и тангенс угла потерь $tg \delta = R/X$.

К ПКС также относят пассивные электрические величины: активное электрическое сопротивление r , электрическую емкость C и индуктивность L . Пассивные электрические величины связаны с комплексным сопротивлением уравнениями

$$\dot{Z} = r + j(X_L - X_C), \quad X_L = \omega L, \quad X_C = \frac{1}{\omega C}, \quad (1.5)$$

Очевидно, что круговая частота ω синусоидального напряжения на объекте измерения, которая входит в уравнение (1.5), также должна рассматриваться как ПКС.

Поскольку две первых модели объекта измерения составляют ПКС с размерностью электрического сопротивления, то измерение ПКС с использованием этих моделей следует отнести к совокупным измерениям, которые предполагают нахождение результатов измерений путем решения системы уравнений. Другие модели составляют ПКС, имеющие разные размерности, поэтому измерения комплексного сопротивления с использованием этих моделей следует отнести к совместным измерениям. Перечисленные ПКС рассматриваются как линейные, т.е. их значения не зависят от амплитуды приложенного к объекту синусоидального напряжения.

В измерительной технике используются все приведенные математические модели комплексного сопротивления $\dot{Z}_X$. При этом выбор модели объекта измерения существенно влияет на структуру измерительного устройства и вид уравнения измерения, и, следовательно, на его метрологические характеристики. Математические модели комплексного сопротивления утрачивают эквивалентность при физической реализации в форме уравнения измерения

в средствах измерений из-за различий погрешностей измерения разных ПКС при равных погрешностях прямых измерений напряжения и тока.

Задачи, решаемые путем измерений ПКС, можно разделить на четыре большие группы [10]:

- научные исследования (кинетика электрохимических реакций, процессы в диэлектриках и полупроводниках, коррозия металлов, свойства живых тканей и организмов, физические и биологические процессы);
- контроль параметров технических устройств, элементов и материалов (фильтры, электрические машины, линии связи, пассивные и активные электронные компоненты, полупроводниковые и электроизоляционные

материалы, кварцевые кристаллы, полимеры, термопластики, жидкие кристаллы);

– измерения различных физических величин параметрическими датчиками (емкостными, резистивными и индуктивными): измерение влажности и температуры, электрометрия жидкостей, диэлькометрия, кондуктометрия;

– биомедицинские исследования [11].

В каждой группе задач измерения ПКС имеют свою специфику, обусловленную целью измерения, особенностями объекта измерения, рабочими режимами его функционирования, условиями измерения и последующим использованием результатов измерения.

Выбор метода измерения ПКС и технические требования к средствам измерений ПКС во многом определяются принятой моделью исследуемого объекта. Длительный процесс развития измерений ПКС можно разделить на этапы, отличающиеся моделями объекта измерения [3].

На начальном этапе развития измерений ПКС объектом измерения являлись многоэлементные двухполюсные электрические цепи (МДЭЦ), образованные последовательным и (или) параллельным соединением резистор, конденсатор и катушка индуктивности, причем структура МДЭЦ известна априори. Измеряемыми ПКС здесь выступают активное сопротивление R резистора, емкость C конденсатора и индуктивность L катушек индуктивности. Измерения этих ПКС осуществлялись с использованием физической модели объекта в виде МДЭЦ с той же структурой что и объект, и известными значениями параметров, позволяя реализовать измерение на основе принципа подобия. Отличие физической модели от объекта измерения состоит в том, что все или, по крайней мере, некоторые элементы модели являются регулируемыми. Регулируемые элементы физической модели выступают в процессе измерения в качестве многозначных мер пассивных электрических величин с нормированными метрологическими характеристиками. В процессе измерения объект измерения непосредственно сравнивается с однородной ему моделью, т.е. реализуется прямое измерение тех ПКС, меры которых составляют физическую модель объекта измерения. Естественной областью применения физических моделей электрических цепей является внутрисхемный контроль пассивных электронных компонентов [12].

На втором этапе эволюции моделей объект измерения, описываемый рядом функциональных параметров и характеристик, моделируется линейной МДЭЦ с известной структурой. Уравнения связи измеряемых параметров объекта с ПКС МДЭЦ составляют математическую модель объекта измерения. Значения искомых параметров объекта измерения определяются как решения системы уравнений связи.

Совместное использование электрической и математической моделей позволило использовать средства измерений ПКС в измерительных задачах всех указанных выше типов. Двухэлементные линейные МДЭЦ являются электрическими моделями широчайшего перечня самых различных физических, химических, биологических объектов и процессов, позволяющими исследовать их функциональные свойства на основе связи этих свойств с комплексным сопротивлением [3, 13].

Качество конденсаторов в процессе их производства достоверно оценивается не только по отклонению емкости от номинального значения, но и по значению тангенса угла потерь, а качество катушек индуктивности и трансформаторов – не только по отклонению индуктивности от номинального значения, но и по значению добротности. Появилась возможность использовать различные модели одного и того же объекта в зависимости от области его применения. Так, качество высокочастотных пленочных резисторов в наибольшей мере отражает *LR*-модель, а низкочастотных проволочных резисторов – *CR*-схема.

На рисунке 1.2 представлены варианты трехэлементных *LRC* электрических цепей с конечным сопротивлением на постоянном токе, как это имеет место на практике. Четыре варианта трехэлементных электрических *RC*-цепей можно разделить на две пары: схемы *а, в* и *б, г*. Схемы в каждой пары имеют одинаковую структуру дробно-полиномиальной передаточной функции $\dot{Z}(j\omega)$ (одинаковое расположение полюсов и нулей на комплексной плоскости). Это свидетельствует о том, что при отсутствии априорной информации о структуре электрической цепи (наличие внутреннего недоступного узла схемы или его отсутствие) эти схемы эквивалентны [5]. В качестве моделей объекта измерения ПКС при выборе метода измерений и разработке средств измерений рекомендуется использовать схемы замещения, представленные на рисунке 1.2 *а, в, д, ж, и, л, н, р*.

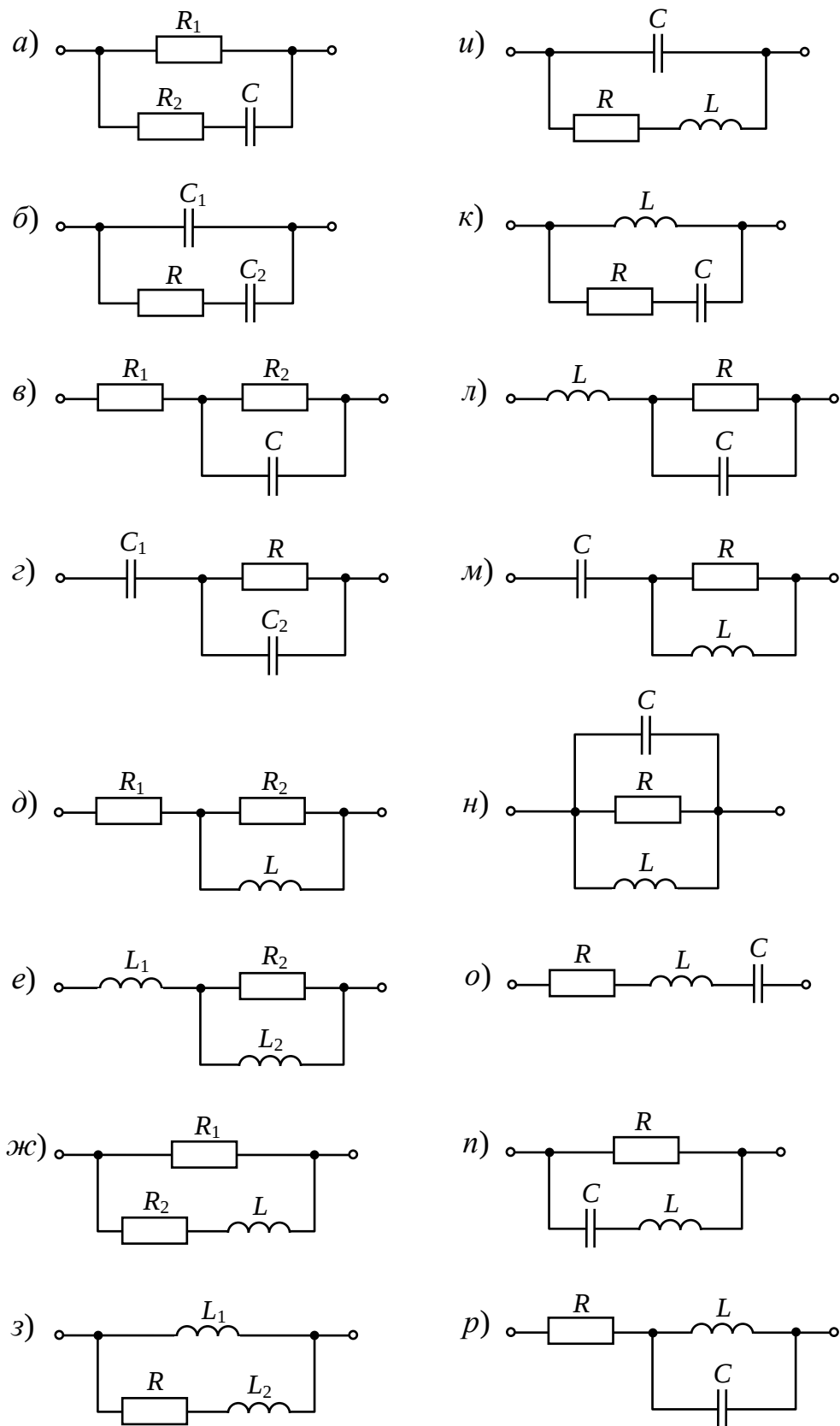


Рисунок 1.2 – Трехэлементные электрические цепи с комплексным сопротивлением

Установление требования конечного сопротивления на частоте резонанса к резонансным схемам (рисунок 1.2, *и–д*) позволяет исключить также варианты (рисунок 1.2, *п, л*).

Трехэлементные электрические цепи (рисунок 1.2, *а, б*) предлагаются в качестве схем замещения диэлектриков [10], кондуктометрических ячеек [14], электролитических конденсаторов [15]. Электрическая схема (рисунок 1.2, *в*) является моделью обратно смещенному *p–n*-переходу [16].

Схема на рисунке 1.2, *г* является моделью датчика влажности [17], воздушной меры емкости на высоких частотах [18] и пьезорезонансного датчика [19]. Схема на рисунке 1.2, *д* используется в качестве модели катушки индуктивности, а схема на рисунке 1.2, *е* – в качестве модели индуктивного датчика влажности [10].

Резонансная цепь (рисунок 1.2) является схемой замещения проволочного резистора и проволочной катушки индуктивности [20]. Эта цепь также используется как электрическая модель структурирования воды в водных растворах [21]. Схема на рисунке 1.2, *в* является электрической моделью электрической дуги [8]. Схем на рисунке 1.2, *м*, о моделируют конденсатор на высоких частотах [22].

Схема на рисунке 1.2, *н* используется в качестве модели структуры металл-диэлектрик-металл (МДМ – структуры) полупроводниковых устройств [23].

Во многих случаях эквивалентные схемы замещения содержат более трех элементов. На рисунке 1.3 представлены 4-элементные линейные схемы замещения электрохимических объектов измерения ПКС [10].

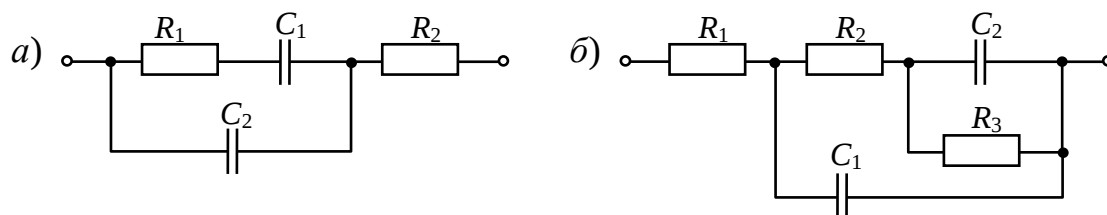


Рисунок 1.3 – Многоэлементные линейные схемы замещения электрохимических объектов

На рисунке 1.4 представлена 4-элементная эквивалентная схема катушки индуктивности, являющаяся адекватной электрической моделью в широком частотном диапазоне [24]

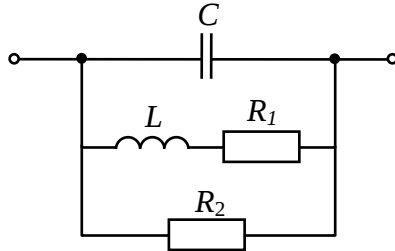


Рисунок 1.4 – 4-элементная эквивалентная схема катушки индуктивности

Корректное для исследователя, использующего средство измерений ПКС как инструмент исследования, описание исследуемых свойств физического объекта возможно только на основе математических моделей, разработанных в данной области науки. Необходимо отметить, что в некоторых областях науки электрические схемы замещения не используются. Примером является классическая теория диэлектриков [25]. В этом случае уравнения связи ПКС с измеряемыми величинами и параметрами объекта исследования должны быть синтезированы в процессе разработки средства измерений.

В процессе развития измерительной техники преобразование в ПКС все чаще выступает как промежуточный этап преобразования искомой неэлектрической величины в активную электрическую величину (напряжение, ток, заряд). Наблюдается усложнение схем замещения с целью расширения круга решаемых измерительных задач, повышения универсальности измерительного устройства. Усложнение модели происходит количественно, за счет увеличения числа элементов линейной электрической схемы, но, в гораздо большей мере, качественно: за счет синтеза новых типов элементов МДЭЦ.

Новые типы элементов, из которых синтезируется электрическая схема замещения, описываются определенными математическими моделями и вводятся как компоненты в математическую модель объекта измерения. а также

его зависимости от амплитуды напряжения на объекте измерения (нелинейность ПКС), температуры и других влияющих величин.

Расширение элементного базиса моделирования объекта исследования ярко проявляется в программном обеспечении электрохимических исследований методом импедансной спектроскопии. В потенциодинамической электрохимической импедансной спектроскопии предлагается следующий набор параметров модели электрохимического импеданса [26]: емкость, активное сопротивление, индуктивность, коэффициент Варбурга, параметры «короткозамкнутого» и «открытого» элементов Варбурга, преэкспоненциальный коэффициент и экспонента – параметры элемента постоянной фазы, два параметра элемента Геришера и, при необходимости, параметры элемента, определяемого пользователем.

Импеданс Варбурга моделирует поляризационную емкость и поляризационное сопротивление в приэлектродной области:

$$\dot{Z}_W = \frac{A_W}{\omega^{0,5}} - j \frac{A_W}{\omega^{0,5}}, \quad (1.6)$$

где A_W – коэффициент Варбурга, $Ом / с^{0,5}$,

$$A_W = \frac{R \cdot \Theta}{\sqrt{2n^2FA}} \left[\frac{1}{\sqrt{D_O}C_{S,O}} + \frac{1}{\sqrt{D_O}C_{S,R}} \right], \quad (1.7)$$

где R – универсальная газовая постоянная, Θ – абсолютная температура, A – площадь поверхности электрода, D_O – коэффициент диффузии электроактивных слоев, $C_{S,O}$, $C_{S,R}$ – поверхностные концентрации окисированной и ослабленной форм.

«Короткозамкнутый» элемент Варбурга имеет импеданс

$$\dot{Z}_{W_S} = \dot{Z}_W \tanh\left[\frac{d}{D^{0,5}} \cdot (j\omega)^{0,5}\right], \quad (1.8)$$

где d – толщина диффузионного слоя Нернста.

«Открытый» элемент Варбурга имеет импеданс:

$$\dot{Z}_{W_s} = \dot{Z}_W \cdot \coth\left[\frac{d}{D^{0,5}} \cdot (j\omega)^{0,5}\right]. \quad (1.9)$$

Импеданс элемента постоянной фазы CPE (constant phase element) описывается выражением

$$\dot{Z}_{CPE} = \frac{1}{(j\omega)^p C}, \quad (1.10)$$

где p - безразмерный показатель степени, $0 < p \leq 1$. При $p=1$ элемент CPE эквивалентен электрической емкости и создает фазовый сдвиг напряжения относительно тока 90° . При $p < 1$ элемент CPE сохраняет постоянный фазовый сдвиг при изменениях частоты воздействия, но этот фазовый сдвиг меньше 90° . При постоянной частоте напряжения питания измерительной схемы элемент CPE может замещать в эквивалентной схеме многоэлементную RC – цепь, что позволяет упростить модель объекта измерения.

Элемент Геришера (G - элемент) имеет два параметра Y_G и K_G . Импеданс G -элемента задается выражением

$$\dot{Z}_G = (Y_G \cdot (K_G + j\omega)^{0,5})^{-1}. \quad (1.11).$$

На рисунке 1.5 представлены схемы замещения электрохимических объектов, содержащие импеданс Варбурга [10].

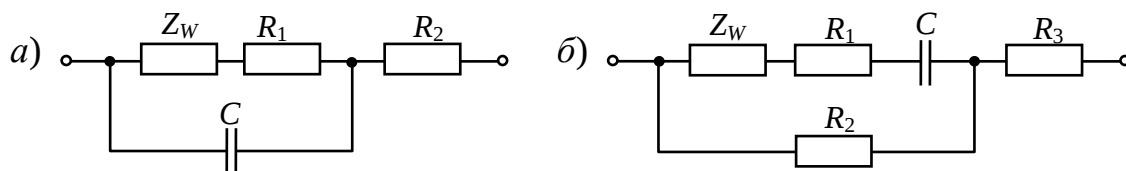


Рисунок 1.5 Схемы замещения электрохимических объектов с импедансом Варбурга

При исследовании методом импедансной спектроскопии толерантности каталитических электродов R_t , R_d и R_dR_u низкотемпературных топливных элементов к углекислому газу используются эквивалентные схемы импеданса реакции водорода, представленные на рисунке 1.6 [27].

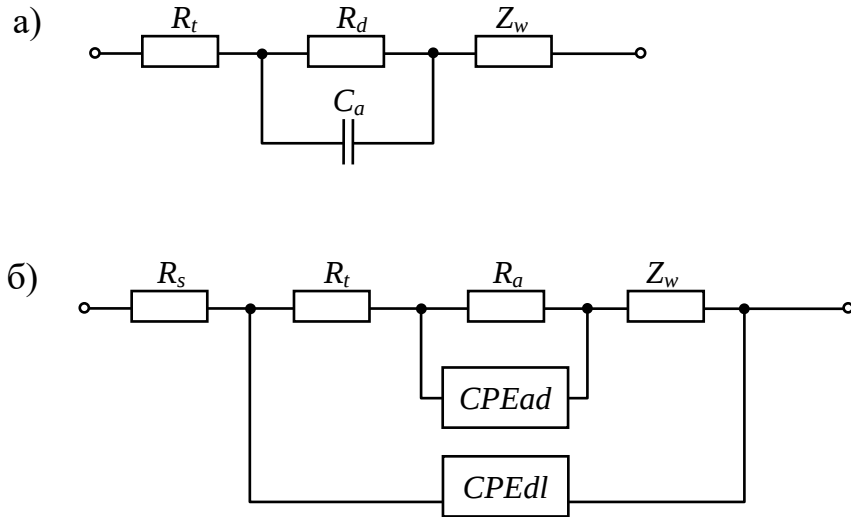


Рисунок 1.6 – Эквивалентные схемы импеданса реакции ионизации водорода в газовых смесях

Полный импеданс электрода описывается уравнением

$$\dot{Z} = R_s + \left(\frac{1}{Y^{-1} + Z_w} + j\omega C_d \right)^{-1}, \quad (1.12)$$

где R_s – сопротивление раствора, C_d – емкость двойного слоя; Y – фарадеевский адмиттанс.

Фарадеевский адмиттанс Y , эквивалентная схема которого приведена на рисунке 1.6, описывается уравнением

$$\dot{Y} = \frac{1}{R_t} + \frac{A}{B + j\omega}, \quad (1.13)$$

где $A = \frac{R_a + R_t}{R_a C_a R_t^2} - \frac{1}{R_a C_a R_t}$, $B = \frac{R_a + R_t}{R_a C_a R_t}$, R_t – сопротивление переноса заряда

при фиксированной адсорбции водорода, Кл/м², Ом; R_a – сопротивление,

обусловленное адсорбцией водорода, Ом; $\dot{Z}_w$ – короткозамкнутый импеданс Варбурга, описывающий фарадеевский процесс, Ом.

$$Z_w = R_d \cdot \frac{\tanh(j\omega\delta^2 / D)^\alpha}{(j\omega\delta^2 / D)^\alpha}, \quad (1.14)$$

где R_d – диффузионное сопротивление; δ – эффективная толщина диффузионного слоя; D – коэффициент диффузии молекулярного водорода; p – показатель степени, близкий к 0,5.

Эквивалентные линейные схемы, амплитудно-частотные характеристики которых аппроксимируют импеданс Варбурга с требуемой точностью, содержат большое числа элементов (обычно от 4 до 6) [28]. При этом общее число линейных элементов в схеме может превышать 10.

С увеличением частоты напряжения, приложенного к электрохимической ячейке, модуль комплексного сопротивления убывает существенно медленнее, чем $1/\omega$. Схема замещения ячейки рис. 1.6, а с конденсатором C_a не отражает эту особенность частотной характеристики. Для повышения адекватности комбинированной модели электрохимическому процессу конденсатор заменяется в модели элементом постоянного фазового угла CPE, как показано на рисунке 1.6,б.

Элемент Геришера используется в качестве электрической модели гомогенной химической реакции [29]. На рисунке 1.7 представлена эквивалентная схема анодного окисления кадмия, содержащая элементы Варбурга и Геришера.

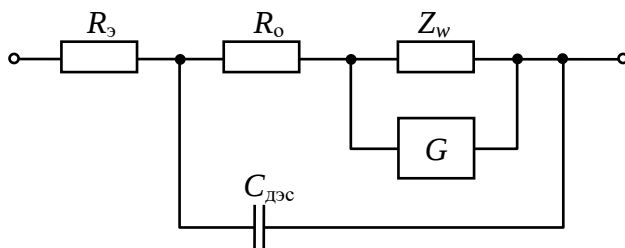


Рисунок 1.7 – Эквивалентная схема процесса анодного окисления кадмия в ограниченном объеме щелочного электролита

Существенной особенностью импеданса Варбурга является его непосредственная зависимость от температуры (1.7). В теории диэлектриков аналогичную роль играют уравнения Фрелиха, описывающие зависимость диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь от температуры [25].

Для того чтобы параметры модели могли быть измерены существующими средствами измерений, модель объекта упрощают до 2–4 элементов. При этом должно выполняться неравенство:

$$z \gg \frac{1}{\omega C_D}. \quad (1.15)$$

В связи с этим получило развитие моделирование объекта измерения различными схемами на разных участках диапазона изменения влияющей величины [30].

Наиболее употребительные модели ПКС гомогенных и гетерогенных объектов представлен в таблице 1.1 [31–33].

По результатам инвариантных измерений параметров элементов линейной МДЭЦ с известной структурой определяются параметры гомогенной структуры на основе предварительно теоретически или экспериментально определенных функциональных связей параметров элементов МДЭЦ и параметров структуры. Электрические модели на основе линейных МДЭЦ адекватно описывают электропроводность только гомогенных объектов. Для моделирования электропроводности гетерогенных объектов предложено большое количество виртуальных элементов как линейных, так и нелинейных. Качественное повышение степени адекватности модели в виде МДЭЦ гетерогенному объекту измерения достигается переходом от линейной модели к нелинейной. На рисунке 1.8 представлена нелинейная модель водородного топливного элемента [34]. По частотной характеристике импеданса проводится идентификация параметров четырех основных элементов электрической модели топливного элемента: линейных элемента Варбурга $\dot{Z}_w$ и объемного

сопротивления мембраны R_M , а также нелинейных емкости двойного слоя $C(U)$ и сопротивления электрохимической реакции $R_e(U)$.

Таблица 1.1 – Модели ПКС гомогенных и гетерогенных объектов

Наименование элемента	Условное обозначение элемента	Параметры комплексного сопротивления элемента	Комплексное сопротивление элемента АФЧХ
Resistor	R	R	R
Inductor	L	L	$j\omega L$
Capacitor	C	C	$\frac{1}{j\omega C}$
Элемент постоянной фазы полубесконечный	CPE	T, α	$\frac{R}{(j\omega\tau)^\alpha}$
Элемент постоянной фазы конечный *	BPE	R, α	$\frac{R}{(j\omega)^\alpha} \cdot th(\frac{R_0}{R} \cdot (j\omega)^\alpha)$
Элемент Дебая емкостный	R//C	R, C	$\frac{R}{1 + j\omega CR}$
Элемент Дебая индуктивный	R//L	R, L	$\frac{j\omega LR}{R + j\omega L}$
Элемент Коул-Коул Cole-Cole-type	R//CPE	R, T, α	$\varepsilon = \frac{\varepsilon_S - \varepsilon_D}{1 + (j\omega\tau_0)^{1-\alpha}},$ $R/(1 + T(j\omega)^\alpha)$
Элемент Варбурга	W-trd	$T, \alpha(=0,5)$	$R/(j\omega\tau)^\alpha$
Элемент Варбурга массовый диссипативный	W-md	$R, T, \alpha(=0,5)$	$\frac{R \tanh(j\omega\tau)^\alpha}{(j\omega\tau)^\alpha}$
Элемент Варбурга немассовый диссипативный	W-nmd	$R, T, \alpha(=0,5)$	$\frac{R \coth(j\omega\tau)^\alpha}{(j\omega\tau)^\alpha}$
Элемент Геришера- I Gerischer type-I	G-I	$R, T, \alpha(=1)$	$\frac{R}{\sqrt{1 + (j\omega\tau)^\alpha}}$
Элемент Геришера- II Gerischer type-II	G-II	$R, T, \alpha(=0,5)$	$\frac{R}{(1 + j\omega\tau)^\alpha}$
Элемент Гаврильяка-Негами	H-N	$R, T,$ $\alpha \in [0;1], \beta \in [0;1]$	$\varepsilon = \frac{\varepsilon_S - \varepsilon_D}{[1 + (j\omega\tau_0)^{1-\alpha}]^{1-\beta}}$

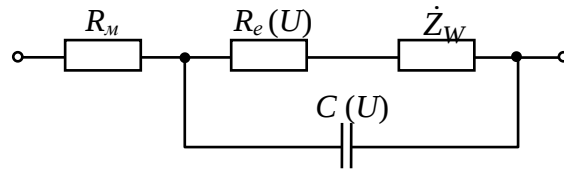


Рисунок 1.8 – Электрическая модель водородного топливного элемента

На рисунке 1.9 представлена эквивалентная схема процесса диффузии в литий-ионном аккумуляторе, содержащая нелинейный резистор, сопротивление которого зависит от проходящего через него тока, и нелинейный конденсатор, емкость которого зависит от приложенного к нему напряжения [35].

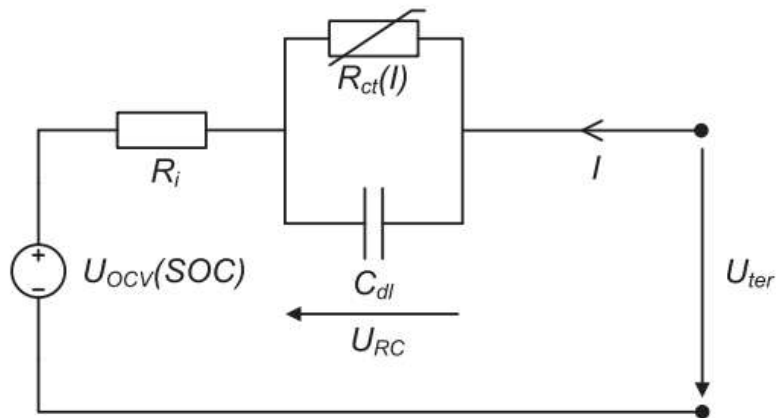


Рисунок 1.9 – Эквивалентная схема процесса диффузии в литий-ионном аккумуляторе

При исследовании гетерогенных объектов в достаточно широком диапазоне частот невозможно моделировать объект исследования каким-либо одним элементом даже из расширенного элементного базиса (таблица 1.1). В связи с этим на разных участках диапазона частот используются различные модели объекта. Так, зависимость реактивной составляющей комплексного сопротивления литий-ионного аккумулятора от активной составляющей комплексного сопротивления разделена на три поддиапазона [35]. Для каждого поддиапазона подобрана схема замещения, форма амплитудно-частотной

характеристики которой совпадает с формой соответствующего участка графика зависимости $X = f(R)$ (диаграмма Найквиста).

Анализ публикаций в ведущих научных изданиях за последние годы показал, что современный этап эволюции измерений ПКС характеризуется тем, что исследование функциональных свойств объектов исследования различной природы путем измерений ПКС проводится в виде совместных измерений составляющих комплексного сопротивления в информативном диапазоне частоты синусоидального напряжения, результаты которых предоставляются пользователю в виде диаграммы Найквиста [36–43]. Для гетерогенных объектов построение диаграммы Найквиста всегда дополняется исследованием влияния на форму графика функции $X = f(R)$ нелинейности комплексного сопротивления объекта и, во многих случаях [40, 44–47], его температуры.

1.3 МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПЛЕКСНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Современное состояние измерений ПКС характеризуется многообразием способов и средств измерений. В работе [10] указаны два метода формирования измеряемых величин, характеризующих параметры отклика многоэлементного двухполюсника на электрическое воздействие: метод уравнивания (метод настраиваемой модели) и метод прямого преобразования.

Метод уравнивания (метод настраиваемой модели) состоит в установлении заранее заданных соотношений между параметрами отклика на энергетическое воздействие объекта измерения и параметрами отклика на то же самое воздействие части измерительной схемы, образованной параллельно-последовательным соединением многозначных мер пассивных электрических величин объекта путем подбора значений мер. В устройствах уравнивающего преобразования регулированием значений переменных образцовых мер активного и реактивного сопротивлений достигается состояние

равновесия мостовой измерительной цепи или квазиравновесия (равновесие по одному из двух параметров сигнала разбаланса), которое фиксируется указателем равновесия (квазиравновесия).

Достижение заданных соотношений между параметрами сигналов позволяет установить однозначные соответствия между искомыми параметрами объекта и соответствующими им параметрами его электрической модели. Оба сигнала являются однородными функциями энергетического воздействия, поэтому результаты измерения не зависят от параметров энергетического воздействия. Инвариантность результатов измерений относительно напряжения питания считается основным достоинством метода уравнивающего преобразования.

Метод прямого преобразования состоит в формировании измеряемых параметров непосредственно из отклика объекта измерения на электрическое воздействие путем прямого избирательного преобразования (селекции). Измеряемые параметры являются функциями как искомым параметров объекта, так и параметров напряжения питания измерительной схемы.

К.Б. Карандеевым были разработаны основы теории уравнивания мостовых измерительных схем, обосновавшей возможность достижения частотно-независимого состояния равновесия моста [48]. Создание этой теории позволило осуществить разработку многочисленных вариантов моста переменного тока для раздельного измерения ПКС двухэлементной схемы замещения.

Частотно-независимые мосты подразделяются на квадратурные и экстремальные [49]. В автоматических квадратурных мостах для определения состояния мостовой измерительной схемы используются два фазочувствительных нуль-индикатора. По их показаниям регулировками двух параметров измерительной схемы (электрической модели объекта) поочередно устанавливают сдвиг по фазе между сигналом разбаланса и двумя опорными напряжениями равным 90 угловых градусов. Направление изменения комплексного сопротивления опорного элемента, ведущее к состоянию

равновесия, определяют по знаку информативной проекции сигнала разбаланса – выходного сигнала фазочувствительного нуль-индикатора.

В частотно-независимых экстремальных мостах используется амплитудный нуль-индикатор. Уравновешивание моста состоит в минимизации модуля сигнала разбаланса. Направление изменения параметров опорного элемента определяется по результатам поочередного приращения модуля сигнала разбаланса в функции от каждого из двух регулируемых параметров при постоянном значении другого. Приращение осуществляется минимальным изменением регулируемого параметра и анализом знака соответствующего приращения модуля сигнала разбаланса [50].

Мосты переменного тока различаются также местом включения объекта измерения в мостовую измерительную схему. На рисунке 1.10 представлена измерительная схема, мост Нернста, в которой объект измерения и цепь уравнивания соединяются в вершине моста, подключенной к низковольтному выходу источника гармонического напряжения [51].

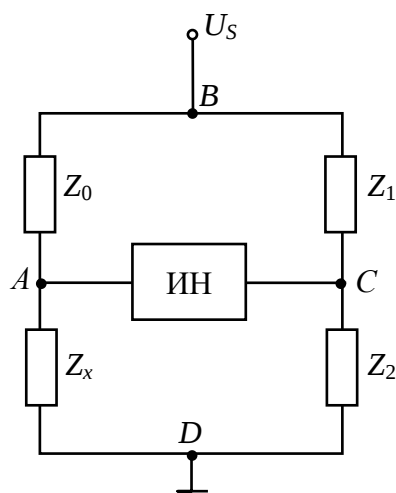


Рисунок 1.10 – Устройство для измерения ПКС методом уравнивающего преобразования с уравниванием напряжения на объекте измерения (мост Нернста)

Ветви АВ и ВС образуют идентичные элементы с комплексными сопротивлениями $\dot{Z}_0$ и $\dot{Z}_1$ соответственно. В ветвь АД включен объект измерения с комплексным сопротивлением $\dot{Z}_x$, для которого задана структура

двухэлементной схемы замещения. В ветвь CD включена цепь уравнивания с регулируемым комплексным сопротивлением $\dot{Z}_2$. Недостатком данного устройства является необходимость поддерживать соответствие между диапазоном измерения ПКС сопротивления и пределами регулирования переменных мер сопротивления в противолежащем объекту измерения плече. При измерении ПКС в области высоких значений модуля (свыше 1 МОм), например, при измерении ПКС объектов из диэлектриков индикатор нуля ИН находится под высоким синфазным напряжением, что усложняет процесс измерения.

Из-за указанных недостатков моста Нернста при измерениях ПКС более широкое распространение получил мост Шеринга (рисунок 1.11), где часть напряжения питания измерительной схемы падает на объекте измерения и единственном высоковольтном опорном элементе в верхнем плече опорного делителя [52].

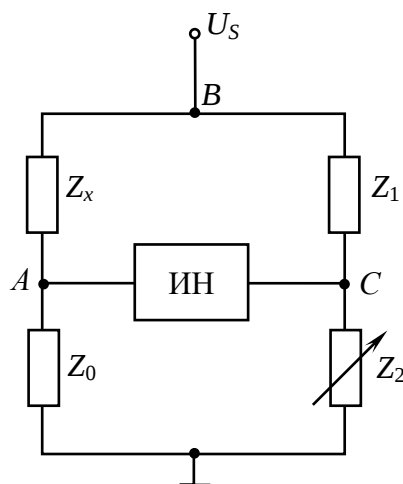


Рисунок 1.11 – Устройство для измерения ПКС с уравниванием напряжения на опорном элементе (мост Шеринга)

Высокое (свыше 1 кВ) напряжение на объекте измерения обеспечивает требуемую чувствительность устройства, и открывает возможность исследований нелинейности параметров объекта в широком диапазоне напряжений.

При достижении состояния равновесия моста выполняется равенство

$$\dot{Z}_x Z_2 = \dot{Z}_0 \dot{Z}_1, \quad (1.16)$$

где $\dot{Z}_x = R_x + jX_x$ – комплексное сопротивление объекта измерения с активной R_x и реактивной X_x составляющими, $\dot{Z}_2 = R_2 + jX_2$ – комплексное сопротивление третьей опорного элемента с активной составляющей R_2 и реактивной составляющей X_2 , $\dot{Z}_0 = R_0$ – комплексное сопротивление первого опорного элемента с активной составляющей R_0 (реактивная составляющая X_0 равна нулю), $\dot{Z}_1 = X_1$ – комплексное сопротивление второго опорного элемента с реактивной составляющей X_1 (активная составляющая R_1 равна нулю). Отсюда для СКС $\dot{Z}_x$ справедливы уравнения

$$R_x = \frac{R_0 X_1 X_2}{R_2^2 + X_2^2}, \quad X_x = \frac{R_0 R_2 X_1}{R_2^2 + X_2^2}. \quad (1.17)$$

В общем случае во всех вариантах в процессе измерения ПКС необходимо проводить уравнивание по обеим составляющим комплексного сопротивления. Это требует, по меньшей мере, двух многозначных мер пассивных электрических величин.

Неизбежная взаимосвязь сигналов управления при уравнивании моста переменного тока по двум активным параметрам измерительной схемы (амплитуда напряжения разбаланса, фазовый сдвиг между напряжениями в средних точках делителей измерительной схемы) приводит к существенному увеличению времени измерения из-за итерационно характера уравнивания. Наиболее эффективным путем решения этой проблемы оказались не попытки уменьшить взаимосвязь сигналов управления, а поиски других алгоритмов процесса уравнивания при взаимосвязанных сигналах управления. Исследования в этом направлении привели к разработке метода координированного уравнивания [53]. Отличительной особенностью данного метода является то, что для определения направления воздействия с целью достижения состояния равновесия используется априорная информация,

информация о знаке отклонения от состояния равновесия или информация о результативности воздействия (приращение информативного параметра, вызванное изменением комплексного сопротивления опорного элемента). Метод координированного уравнивания позволяет проводить одновременное регулирование обоих параметров опорного элемента, что существенно повышает быстродействие средств измерений ПКС.

Переход от двухэлементных к трехэлементным и еще более сложным линейным МДЭЦ во многих областях измерений поставил перед измерительной техникой сложную задачу разработки соответствующих средств измерений ПКС методом уравнивания. При уравнивании по трем параметрам состоянию равновесия моста на фиксированной частоте соответствует множество сочетаний значений трех регулируемых параметров регулирования опорного элемента измерительной схемы, из которых только одно сочетание значений обеспечивает частотно- независимое равновесие моста, т.е. является действительным. Это объясняется тем, что, в отличие от двумерной задачи уравнивания по двум параметрам, задача измерения трех параметров является пятимерной: три регулируемых параметра опорного элемента, частота напряжения питания мостовой схемы и целевой параметр сигнала разбаланса (значение модуля или фазового сдвига напряжения разбаланса) [8].

Разработка мостов переменного тока для измерения параметров трех-, четырехэлементных схем замещения объекта измерения идет в направлении отхода от принципа подобия структуры схемы замещения объекта измерения и регулируемого опорного элемента измерительной схемы. Здесь имеет место переход от физической модели объекта к его электрической модели (адекватность модели объекту имеет место только по комплексному сопротивлению), а в число ПКС включается частота напряжения на объекте измерения.

Широкое распространение получили мостовые устройства для измерения только одной из составляющих комплексного сопротивления путем достижения

состояния квазиравновесия. Отсутствие взаимосвязанных контуров уравнивания позволяет значительно увеличить быстродействие. Квазиуравновешенные мосты при приемлемой точности отличаются от уравниваемых мостов простотой технической реализации. Состояние квазиравновесия достигается регулированием напряжения или тока в одном или двух плечах моста электронными управляемыми делителями. Значение измеряемой величины в состоянии квазиравновесия пропорциональны коэффициенту передачи делителя. Задача измерения обеих составляющих комплексного сопротивления квазиуравниваемым мостом решается последовательно в два этапа с использованием двух различных опорных элементов. На каждом этапе измеряется одна из СКС [54].

На рисунке 1.12 представлена структурная схема квазиуравновешенного преобразователя для измерения емкости C_x и активной проводимости G_x параллельной RC-схемы замещения.

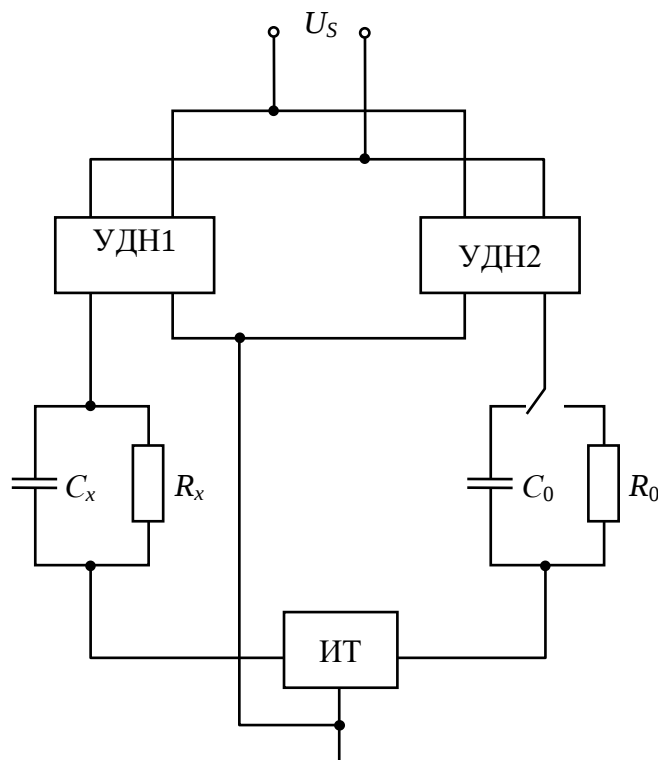


Рисунок 1.12 – Структурная схема преобразователя параметров двухэлементной схемы замещения на основе метода квазиуравнивания

Индикатор тока ИТ формирует разностный ток I тока I_0 через опорную цепь и тока I_X через объект измерения и фиксирует достижение состояния квазиравновесия, определяемого заданными соотношениями токов. Уравновешивание упрощается, но всё же сохраняется в виде приведения измерительной схемы к некоторому определенному состоянию. Поскольку измерение составляющих комплексной проводимости осуществляется последовательно во времени, такие устройства имеют относительно низкое быстродействие.

В дальнейшем совершенствование средств раздельного измерения ПКС идет как за счет синтеза более эффективных алгоритмов уравновешивания и новых схемотехнических решений для мостовых измерительных схем, так и за счет разработки новых способов и устройств прямого преобразования модуля, аргумента или составляющих синусоидального напряжения на элементах измерительной схемы.

На рисунке 1.13 представлена структурная схема устройства для измерения ПКС МДЭЦ на основе метода прямого преобразования [54]. Здесь ВУ – вычитающее устройство, ИФВ – инвертирующий фазовращатель, КФВ – квадратурный фазовращатель, ФП – фазочувствительный преобразователь, ИО – измеритель отношения постоянных напряжений.

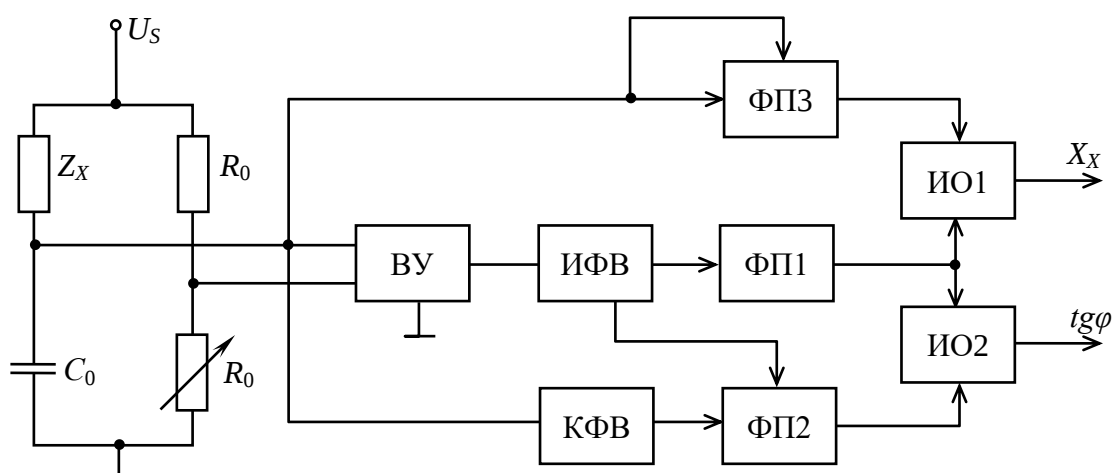


Рисунок 1.13 – Структурная схема устройства для измерения ПКС МДЭЦ на основе метода прямого преобразования

Устройство содержит мостовую измерительную схему с нерегулируемыми опорными элементами (неуравновешенный мост). Путем ряда операций над напряжениями на опорном конденсаторе C_0 и опорном резисторе R_0 (вычитание переменных напряжений, сдвиг переменного напряжения по фазе, инвертирование, фазочувствительное выпрямление, нахождение отношения двух гармонических напряжений) на выходах устройства формируются постоянные напряжения. Эти напряжения прямо пропорциональны реактивной составляющей X_X комплексного сопротивления $\dot{Z}_X$ и тангенсу угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\phi$ объекта измерения. По значениям этих напряжений определяется активная составляющая комплексного сопротивления R_X .

Устройства для измерения ПКС, реализующие метод прямого преобразования, заметно превосходят по быстродействию устройства на основе уравнивающего преобразования. Однако до последнего времени они имели относительно низкую точность преобразования. При аппаратной реализации алгоритмов линеаризации функции преобразования точность измерения ограничивается, в основном, инструментальной погрешностью.

После появления интегральных операционных усилителей широкое распространение получил подход к измерению ПКС, основанный на подаче на объект измерения импульсного напряжения и анализе возникающих при этом переходных процессов [55]. Основным достоинством средств измерений ПКС на основе активной измерительной схемы является возможность формирования линейной или гиперболической зависимости между выходным напряжением измерительной схемы и измеряемым сопротивлением $\dot{Z}_X$, что недостижимо при использовании пассивной измерительной схемы. Уравнения связи между выходным напряжением U_X измерительной схемы пассивных и активной измерительных схем представлены в таблице 1.2.

Перспективы дальнейшего совершенствования данного метода измерения ПКС, в соответствии с принципами универсальности, адаптируемости,

формализации проектирования, состоят в разработке устройств с функциональной и аппаратной избыточностью [56]. Измерению предшествует обработка априорной информации и, при ее недостаточности, предварительная идентификация объекта измерения ПКС, т.е. определение состава и структуры эквивалентной схемы замещения. По результатам обработки априорной информации из перечня вариантов выбирается форма энергетического воздействия на объект и вид опорного элемента путем перекоммутации узлов, которые являются оптимальными для данного объекта по заданным критериям (диапазон измерения, погрешность преобразования, время измерения).

Таблица 1.2 – Уравнения связи между выходным напряжением измерительной схемы пассивных и активной измерительных схем

Пассивный делитель напряжения	Пассивная мостовая схема	Активный делитель напряжения
$U_X = \frac{Z_X U_S}{Z_X + Z_0} \text{ или } U_X = \frac{Z_0 U_S}{Z_X + Z_0}$	$U_X = \frac{U_S Z_X}{Z_X + Z_0} \text{ или } U_X = \frac{U_S Z_0}{Z_X + Z_0}$ $U_0 = \frac{U_S Z_{02}}{Z_{01} + Z_{02}}$	$U_X = \frac{Z_X U_S}{Z_0} \text{ или } U_X = \frac{Z_0 U_S}{Z_X}$

На рисунке 1.14 представлена обобщенная структура устройства для измерения параметров МДЭЦ, которому приданы интеллектуальные свойства адаптивности и самокалибровки за счёт введения в блок самоповерки [57].

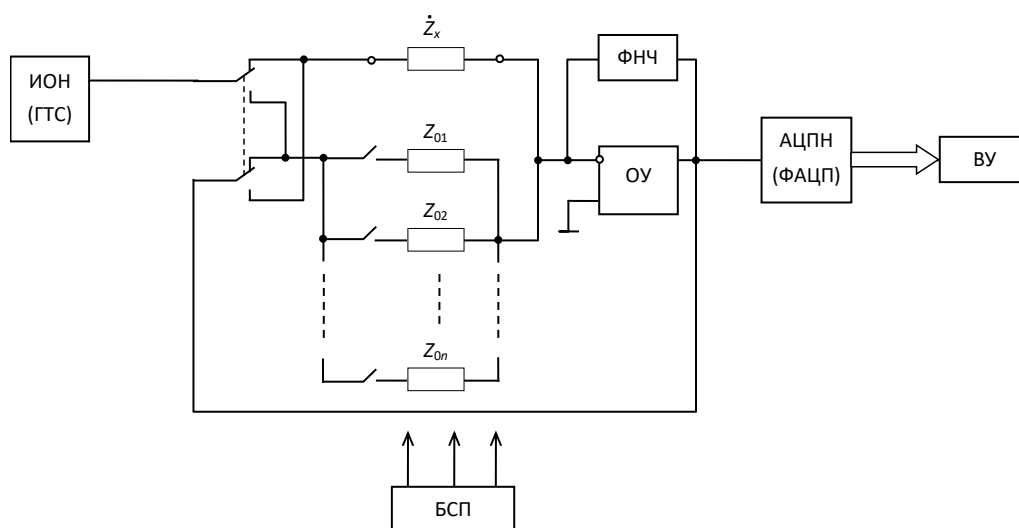


Рисунок 1.14 – Обобщенная структура устройства для измерения параметров МДЭЦ с функцией самоповерки

Устройство составляют активная измерительная схема (ИС) в виде инвертирующего усилителя, состоящего из операционного усилителя (ОУ), фильтра низких частот (ФНЧ), группы из n опорных пассивных элементов электрической цепи $\dot{Z}_{on}$ и объекта измерения с комплексным сопротивлением $\dot{Z}_x$, источника опорного напряжения (ИОН) [56] или блока формирования частотно-временных интервалов (БФЧВИ) [57], аналого-цифрового преобразователя (АЦП) напряжения [56] или фазочувствительного АЦП (ФАЦП) и блока самоповерки (БСП) [57]. Результаты аналого-цифрового преобразования обрабатываются вычислительным устройством (ВУ), которое формирует результаты инвариантного измерения в виде совокупности значений параметров элементов МДЭЦ. В процессе измерения структура канала адаптируется к принятой в качестве электрической модели объекта измерения МДЭЦ: выбирается место включения МДЭЦ в активную измерительную схему (на входе активной измерительной схемы или в цепи ее обратной связи), форма напряжения питания измерительной схемы (меандр, треугольная, пилообразная, синусоидальная или другая), выбирается структура измерительной схемы и алгоритм самокалибровки. Согласно [56] при модели с параллельным соединением элементов, объект измерения включается на входе измерительной схемы, а при модели с последовательным соединением элементов – в цепь отрицательной обратной связи инвертирующего усилителя. Программное обеспечение измерительного канала позволяет ПЭВМ вычислять значения параметров МДЭЦ на основе априорной информации и результатов аналого – цифрового преобразования измерительного сигнала на выходе измерительной схемы ИС.

1.4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕЛИ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ КОМПЛЕКСНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ В РАБОЧИХ РЕЖИМАХ

Измерение ПКС является промежуточной операцией при измерениях параметров широкого круга объектов в различных отраслях техники и научных

исследований. Преобразование искомых параметров объекта исследования в ПКС, значения которых содержит информацию не только об объекте измерения, но и о влияющих величинах (амплитуда и частота приложенного напряжения, температура, давление и т.д.) позволяет унифицировать преобразование разнородных физических величин в электрическое напряжение как величину, наиболее удобную для аналого-цифрового преобразования с целью передачи цифрового измерительного сигнала в вычислительную подсистему ИИС или ИУС для дальнейшей обработки и использования полученной измерительной информации.

Анализ объектов измерения ПКС показал, что они делятся на два типа: гомогенные и гетерогенные. Имеются качественные различия между однородными свойствами гомогенных и гетерогенных объектов. В отношении электропроводности качественное различие состоит в том, что в гетерогенных структурах, кроме электронной проводимости, имеет место ионная и молионная электрическая проводимость. Наличие нескольких типов электрической проводимости вызывает нелинейность электрического сопротивления, поэтому параметры гетерогенных объектов не подчиняются принципу суперпозиции. В связи с этим на измерительную схему корректно подавать только синусоидальное напряжение, и задача измерения ПКС гетерогенного объекта должна рассматриваться как задача импедансометрии.

Модели гетерогенных объектов в виде МДЭЦ, содержащих виртуальные элементы, воспроизводят АФЧХ гетерогенных объектов. Инвариантные измерения параметров таких МДЭЦ затрудняются отсутствием стандартизованных мер виртуальных элементов для использования в качестве опорных элементов измерительных схем. Это определяет актуальность задачи разработки электрической модели гетерогенного объекта, инвариантной структуре МДЭЦ с расширенным элементным базисом, параметры которой могут быть измерены с использованием мер пассивных электрических величин.

К настоящему времени разработано и применяется большое число типов устройств для измерений ПКС, что обусловлено как большим числом ПКС, так

и многочисленностью видов МДЭЦ, моделирующих объект измерения. Это определяет актуальность задачи унификации средств измерений параметров нелинейного комплексного сопротивления. Уменьшение разнообразия структур устройства для измерений ПКС гетерогенных объектов может быть достигнуто путем решения задачи разработки универсальной модели гетерогенного объекта и использованием пассивных измерительных схем в виде неуравновешенного моста и делителя напряжения.

Внедрение микропроцессоров в измерительные устройства дает возможность выполнять необходимые математические цифровыми средствами с погрешностями значительно ниже погрешностей преобразования аналоговых измерительных преобразователей, выполняющих те же функции. Одновременно отпадает необходимость линеаризации функции преобразования: расчет значений искомых ПКС и результатов совместных измерений проводится на основе использования широкого круга нелинейных функциональных зависимостей. При этом значения ПКС могут быть определены, в отличие от измерительных преобразователей с линейной функцией преобразования, по результатам измерения любой пары параметров напряжений на элементах измерительной схемы (амплитуда напряжения и фазовый сдвиг между двумя напряжениями на элементах измерительной схемы или активная и реактивная составляющие напряжения) [58].

Описанные методы измерения ПКС систематизированы на рисунке 1.15.

Наличие в средствах измерений средств вычислений снимает необходимость в разделении способов измерения ПКС в зависимости от линейности или нелинейности функции преобразования. Основное достоинство активной измерительной схемы с включением объекта измерения в цепь отрицательной обратной связи, что обеспечивает линейность функции преобразования [56], теряет свою первостепенную значимость.

В процессорных средствах измерений пассивные измерительные схемы получают преимущества над активными в виде повышения точности измерения ПКС и расширения диапазона изменения амплитуды и частоты напряжения на

объекте за счет исключения составляющих инструментальной погрешности, вносимых операционным усилителем [59].

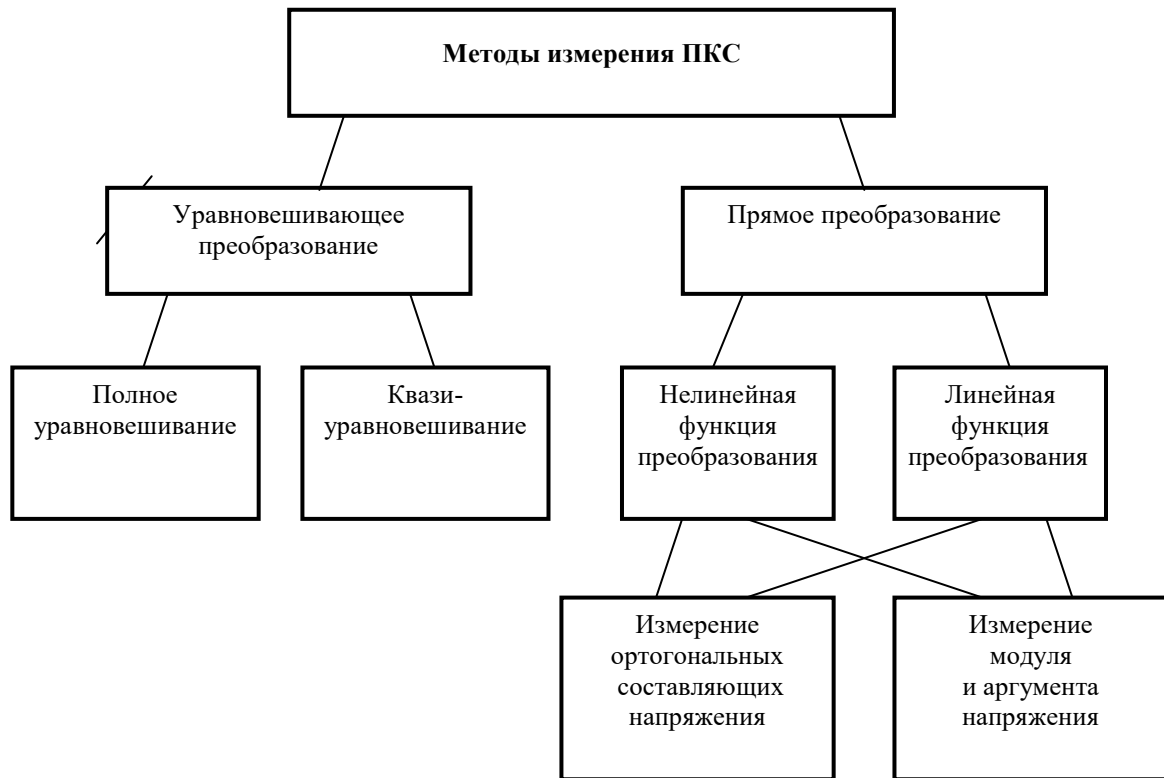


Рисунок 1.15 – Систематизация методов измерения ПКС

При измерениях ПКС гетерогенного объектов в рабочих режимах следует учитывать совокупность особенностей объекта измерений и параметров технических систем, имеющих гетерогенные объекты в своем составе, которые не позволяют использовать существующие приборы для измерения пассивных электрических величин и других ПКС. К основным задачам измерений ПКС гетерогенных объектов в рабочих режимах следует отнести:

- измерения ПКС объекта при амплитуде напряжения на нем, превышающей предел допустимой амплитуды напряжения на имеющихся мерах пассивных электрических величин, что не позволяет проводить измерение методом уравновешивания или методом прямого преобразования на основе неуравновешенного моста;

– измерения ПКС при питании измерительной схемы прибора от внешнего по отношению к нему источника переменного напряжения с ненормированными метрологическими характеристиками, в частности, от промышленной электрической сети. Систематизация рабочих режимов гетерогенных объектов при измерениях ПКС представлена на рисунке 1.16 в виде древовидного графа.

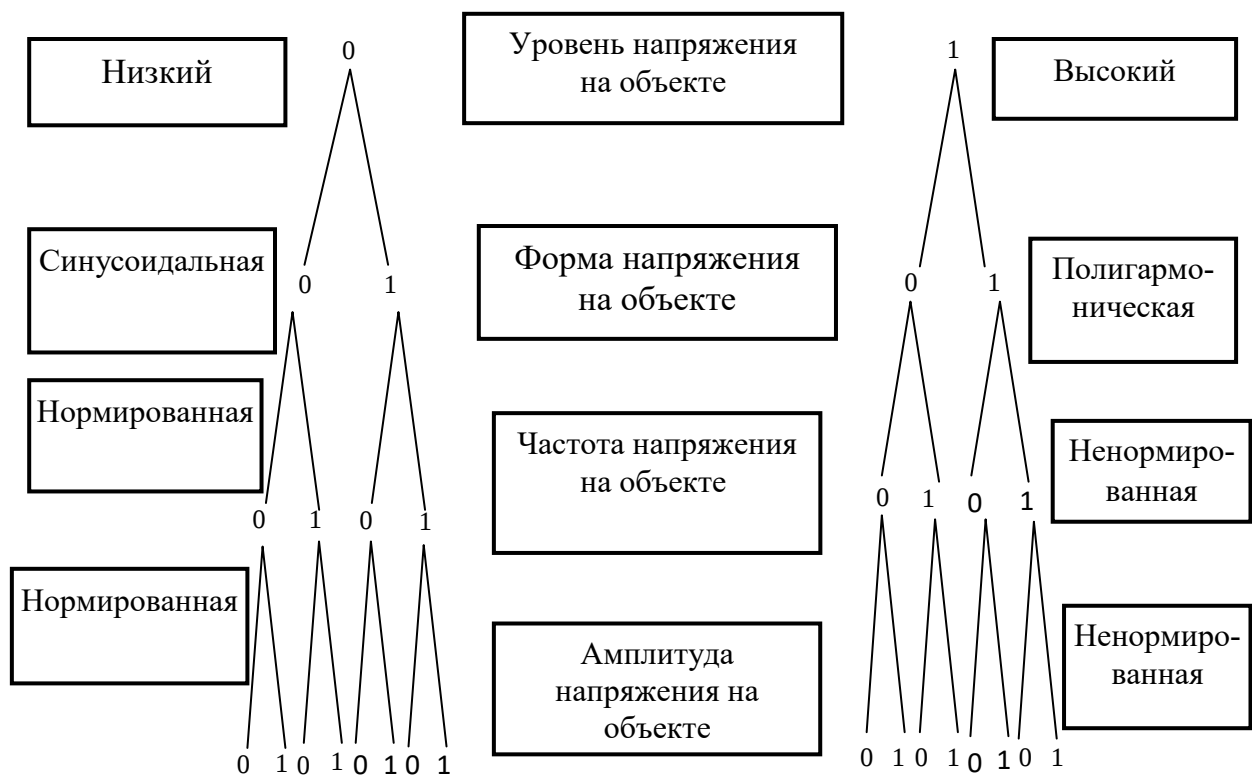


Рисунок 1.16 – Систематизация рабочих режимов гетерогенных объектов при измерениях ПКС

Исходным признаком ветвления графа является уровень напряжения на объекте, который подразделяется на низкий (0) и высокий (1). Граница дихотомии не нормируется конкретным значением, а определяется предельным рабочим напряжением доступного разработчику измерительного прибора для решения конкретной измерительной задачи мер пассивных электрических величин. В практической инженерной деятельности граничное амплитудное значение напряжения обычно составляет 1 кВ. Значение уровня является

критерием выбора типа измерительной схемы устройства для измерения параметров гетерогенного объекта.

Напряжение на гетерогенном объекте в рабочем режиме в общем случае рассматривается как квазипериодическое с метрологически ненормированными спектром, амплитудой и частотой. Наиболее часто встречающимся на практике рабочим режимом является напряжение промышленной электрической сети. При измерениях СКС гетерогенных объектов единственной корректной моделью квазипериодического напряжения следует считать полигармоническое представление (01), (11). Измерения СКС осуществляются путем выделения основной гармоники аналоговыми и цифровыми фильтрами. Кроме того, возникает возможность измерения СКС методом двух частот [60]. Дальнейшее ветвление графа вариантов рабочего режима определяется тем, нормированы частота и амплитуда напряжения питания измерительной схемы (0000), (0100), (1000), (1100) или нет (0011), (0111), (1011), (1111) или только один из параметров напряжения. Рабочие режимы гетерогенного объекта с нормированием только частоты или только амплитуды напряжения отражается, соответственно, ветвями графа (0001), (0101), (1001), (1101) и (0010), (0110), (1010), (1110).

При исследовании гетерогенных объектов все более широкое применение находят спектральная импедансометрия и спектральная диэлькометрия [33]. 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 составляющих комплексного сопротивления (СКС) как унифицированной формы представления комплексного сопротивления.

По результатам анализа проблем и современного состояния измерений функциональных параметров и определения характеристик гетерогенных объектов сформулированы прямая и обратная задачи измерений

функциональных параметров термозависимого нелинейного комплексного сопротивления.

Прямая задача измерений функциональных параметров термозависимого нелинейного комплексного сопротивления: по результатам измерения составляющих комплексного сопротивления гетерогенного объекта, напряжения на нём 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 измерений функциональных параметров термозависимого нелинейного комплексного сопротивления:

- вычислить значение целевого функционального параметра гетерогенного объекта на основе его связи характеристиками взаимосвязи СКС.

На основе анализа особенностей функционирования гетерогенных объектов в рабочих режимах и состояния измерений ПКС сформулирована цель исследования: 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.

Для достижения поставленной цели необходимо решить задачи:

- 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.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1

1 Значительная доля изделий машиностроения, электроники, электротехники, биотехнологий представляют собой объекты с гетерогенной структурой. Измерения многочисленных разнородных функциональных параметров и определение характеристик гетерогенных объектов в ходе процессов производства, испытаний, эксплуатации эффективно производить косвенно на основе прямых измерений параметров комплексного сопротивления. При этом должны быть установлены связи между параметрами комплексного сопротивления и функциональными параметрами гетерогенного объекта.

2 Гетерогенные объекты имеют нелинейные вольт-амперные характеристики, что приводит к нарушению принципа суперпозиции и, следовательно, к неадекватности моделей электропроводности гетерогенных объектов в виде линейных многоэлементных электрических цепей. Поэтому измерение параметров комплексного сопротивления гетерогенных объектов должно производиться исключительно при питании измерительной схемы средства измерений синусоидальным напряжением.

3 Амплитудно-частотные характеристики гетерогенных объектов не описываются дробно-полиномиальными частотными характеристиками многоэлементных электрических цепей, составленных из резисторов, конденсаторов и катушек индуктивности.

4 Функциональные параметры гетерогенных объектов, включая параметры комплексного сопротивления, существенно зависят от температуры. Это вызывает необходимость измерений параметров комплексного сопротивления гетерогенного объекта в рабочих режимах, т.е. в режимах функционирования объекта в ходе процессов производства, испытаний, эксплуатации. Рабочий режим гетерогенного объекта, функциональные параметры которого определяются путем измерения параметров комплексного сопротивления, составляют амплитуда и частота синусоидального напряжения на объекте и температура объекта.

5 К актуальным нерешенным задачам измерений ПКС гетерогенных объектов в рабочих режимах следует отнести:

- измерения ПКС объекта при амплитуде синусоидального напряжения на нем, превышающей предел допустимой амплитуды напряжения на имеющихся мерах пассивных электрических величин, что не позволяет проводить измерение методом уравнивания или методом прямого преобразования на основе неуравновешенного моста;

- измерения ПКС при питании измерительной схемы прибора от внешнего по отношению к нему источника переменного напряжения с

ненормированными метрологическими характеристиками, в частности, от промышленной электрической сети.

6 Устройства для измерений ПКС методом уравнивающего преобразования не обладают необходимым быстродействием для использования в производственных и испытательных информационно-управляющих системах. Устройства для измерений ПКС методом прямого преобразования имеют более высокое быстродействие, но относительно низкую точность измерения. Расширение их функциональных возможностей и повышение точности может быть достигнуто переходом от активных к пассивным измерительным схемам в виде неуравновешенного моста и делителя напряжения.

7 На основе анализа особенностей функционирования гетерогенных объектов в рабочих режимах и состояния измерений параметров комплексного сопротивления сформулирована цель исследования: 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.

8 Определены задачи исследования, решение которых позволяет достичь поставленную цель:

- анализ и систематизация методов и средств измерений параметров комплексного сопротивления в задачах измерений функциональных параметров гетерогенных объектов в рабочих режимах.
- разработка структуры процесса измерения параметров гетерогенного объекта в рабочем режиме на основе измерений параметров комплексного сопротивления и влияющих на него физических величин.
- разработка структуры и алгоритма функционирования устройства для измерения параметров нелинейного комплексного сопротивления.

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

– метрологический анализ измерительных приборов и информационно-измерительных систем для измерений параметров нелинейного термозависимого комплексного сопротивления.

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

– разработка измерительных приборов и создание новых элементов структуры информационно – измерительных систем для измерений параметров гетерогенных объектов и влияющих на них величин.

ГЛАВА 2

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ КОМПЛЕКСНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ В РАБОЧИХ РЕЖИМАХ

В данной 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.

Основные результаты исследования, представленные в данной главе опубликованы в работах [3, 5, 6, 61–72, 81].

2.1 КОМБИНИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ ГЕТЕРОГЕННОГО ОБЪЕКТА ИЗМЕРЕНИЯ В РАБОЧИХ РЕЖИМАХ

Основой решения прямой и обратной задач импедансометрии и унификации на этой основе средств измерений функциональных параметров гетерогенного объекта в рабочих является универсальная модель гетерогенного объекта измерения, которая представляет собой комбинацию электрической и математической моделей (рисунок 2.1) [62, 63].

Объект измерения описывается искомыми функциональными параметрами A , B , амплитудой U и частотой ω приложенного к нему синусоидального напряжения, температурой Θ . Электрическая модель процесса измерения представляет собой пассивный двухполюсный электрический элемент с комплексным сопротивлением $\dot{Z}_x$, являющимся функцией параметров A , B , U , ω , Θ . Измеряемыми параметрами электрической

модели являются СКС объекта, амплитуда и частота синусоидального напряжения на объекте, температура объекта, которая измеряется путём преобразования в пассивную (термометры сопротивления) или активную (термоэлектрические преобразователи) электрическую величину. Другие ПКС, при необходимости, вычисляются программным обеспечением средства измерений подстановкой результатов измерений СКС в уравнения их связи с СКС. Это позволяет рассматривать измерения всех ПКС как совокупные измерения СКС и унифицировать аппаратную часть средств измерений ПКС. Взаимосвязь ПКС с СКС определяется выражениями (1.2)–(1.6).

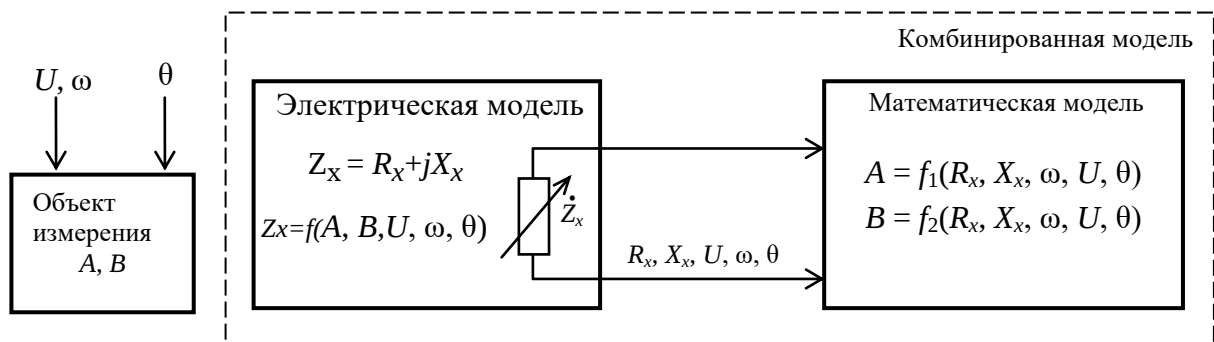


Рисунок 2.1 – Комбинированная модель гетерогенного объекта измерения в рабочих режимах

Объект измерения описывается искомыми функциональными параметрами A , B , амплитудой U и частотой ω приложенного к нему синусоидального напряжения, температурой Θ . Электрическая модель процесса измерения представляет собой пассивный двухполюсный электрический элемент с комплексным сопротивлением $\dot{Z}_x$, являющимся функцией параметров A , B , U , ω , Θ . Измеряемыми параметрами электрической модели являются СКС объекта, амплитуда и частота синусоидального напряжения на объекте, температура объекта, которая измеряется путём преобразования в пассивную (термометры сопротивления) или активную (термоэлектрические преобразователи) электрическую величину. Другие ПКС,

при необходимости, вычисляются программным обеспечением средства измерений подстановкой результатов измерений СКС в уравнения их связи с ПКС. Это позволяет рассматривать измерения всех ПКС как совокупные измерения СКС и унифицировать аппаратную часть средств измерений ПКС. Взаимосвязь ПКС с СКС определяется выражениями (1.2)–(1.6).

Математическая модель в составе комбинированной гетерогенного объекта в рабочих режимах представляет собой принятую в данной предметной области специализированную систему уравнений связи искомых функциональных параметров A , B объекта измерения с СКС, частотой и действующим значением синусоидального напряжения на объекте измерения и его температурой. В задачах, где число функциональных параметров n гетерогенного объекта превышает два, измерение СКС осуществляется не менее, чем при $n/2$ значениях частоты синусоидального напряжения [5].

Синтез комбинированной модели гетерогенного объекта в рабочих режимах позволяет унифицировать аппаратную часть средств реализации импедансной спектроскопии [64, 65] и диэлькометрической спектроскопии [66, 67].

При использовании в качестве электрической модели двухэлементной резистивно-емкостной МДЭЦ с параллельным соединением элементов ее комплексное сопротивление $\dot{Z}_X$ определяется следующим образом:

$$\dot{Z}_X = \frac{1}{1/R + j\omega C}; \quad R_X = \frac{R}{1 + \omega^2 R^2 C^2}; \quad X_X = \frac{\omega C R^2}{1 + \omega^2 R^2 C^2}. \quad (2.1)$$

При диэлектрике объект измерения рассматривается как образец диэлектрика, помещенный между обкладками ёмкостного датчика с собственной ёмкостью C_0 :

$$\dot{Z}_X = \frac{1}{j\omega C_0(\varepsilon_1 + j\varepsilon_2)} = \frac{\varepsilon_1}{\omega C_0(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2)} + j \frac{\varepsilon_2}{\omega C_0(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2)}. \quad (2.2)$$

В этом случае СКС объекта измерения определяются выражениями

$$R_X = \frac{\varepsilon_1}{\omega C_0(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2)} \quad X_X = \frac{\varepsilon_2}{\omega C_0(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2)}. \quad (2.3)$$

Параметры импедансной и диэлькометрической моделей связаны соотношениями [6]:

$$\varepsilon_1 = (1 + C) / C_0, \quad \varepsilon_2 = 1 / (R\omega C_0). \quad (2.4)$$

Определение функциональных параметров гетерогенного объекта по результатам измерения СКС может осуществляться в несколько этапов. Так, при описании АФЧХ образца диэлектрического материала уравнением Дебая на первом этапе определяются значения составляющих ОДП путём решения системы уравнений (), а на втором этапе определяются искомые параметры уравнения Дебая: постоянная времени релаксации τ и степенной коэффициент α .

Метрологический анализ измерений ПКС на основе измерения СКС аналитическим методом затруднен громоздкостью получаемых выражений. В связи с этим предложено проводить метрологический анализ методом Монте-Карло (метод статистических испытаний) [73].

В простейшем случае метод Монте-Карло состоит в синтезе математической модели объекта исследования в виде случайной величины, генерации ряда независимых испытаний (реализаций) этой случайной величины и определении статистических характеристик полученной выборки. Поскольку метод Монте-Карло требует проведения большого числа испытаний, его часто называют методом статистических испытаний. При этом метод Монте-Карло может быть использован не только для симметричных, но и для асимметричных распределений [74]. Метод Монте-Карло в ходе научных исследований не может заменить аналитические методы при исследовании малоизученных объектов, где предварительно необходимо выявление качественных закономерностей, описывающих объект исследования.

При проектировании средств измерений объект проектирования качественно определен на этапе составления уравнения измерения. Последующий метрологический анализ позволяет получить оценку характеристик погрешности измерений, количественную характеристику точности, по известным характеристикам погрешности элементарных

измерительных операций. Типичная методическая ошибка метода Монте-Карло 5-10 % [73] полностью удовлетворяет требованиям к точности оценивания погрешности измерения.

Применение метода Монте-Карло дает наибольший эффект по сравнению с аналитическими методами при оценивании характеристик погрешности результатов косвенных, совместных и совокупных измерений, когда обрабатываются результаты прямых измерений двух и более величин, что имеет место при измерении параметров нелинейного комплексного сопротивления. Так, методом Монте – Карло получена оценка случайной погрешности произведения результатов измерений, полученных с помощью сложных измерительных каналов измерительных систем с номинальной линейной функцией преобразования [74].

Задача оценивания случайной погрешности измерения возникает при измерениях ПКС, за исключением СКС, с использованием комбинированной модели процесса измерения. Методом Монте-Карло получены оценки случайных погрешностей результатов измерений ПКС, определяющих состояние высоковольтного электроизолятора под высоким рабочим напряжением по ГОСТ 30421–96 (таблица 2.1), на основе результатов измерений СКС с известным законом распределения случайной погрешности, что необходимо при техническом обслуживании систем электроснабжения по состоянию [52].

Таблица 2.1 – Предпочтительные пары ПКС высоковольтных электроизоляторов по рабочим напряжением

Предпочтительные пары	
Главная величина	Дополнительный параметр
C или I/C	$tg\delta$
C или I/C	R
C или I/C	G
R или G	C или I/C
R или G	$tg\varphi$
$tg\delta$	C или I/C

В соответствии с ПМГ 96–2009 «Результаты и характеристики качества измерений. Формы представления», в случаях, когда результаты измерений используются совместно с другими результатами измерений, за характеристики качества измерений принимают точечные характеристики – среднеквадратичное отклонение (СКО) погрешности или стандартную неопределенность. Точечная характеристика должна сопровождаться указанием принятой аппроксимации закона распределения плотности вероятностей погрешности. ПМГ 96-2009 распространяются на случайные погрешности прямых измерений, функции плотности распределения вероятностей которых относятся к классу симметричных, одномодальных, усеченных функций. Оценки основаны на предположениях о распределении погрешностей прямых измерений по закону равномерной плотности как наихудшему (дающему для СКО оценку сверху) из законов распределения, относящихся к указанному классу, и отсутствует корреляция между величинами, измеряемыми прямым методом, и погрешностями их измерений [68].

Для оценки характеристик случайной погрешности результатов измерений ПКС электроизоляторов проведено моделирование в среде MathCAD методом Монте-Карло с построением по результатам статистических испытаний гистограммы распределения плотности вероятностей случайной погрешности. Входные переменные программы: число реализаций N ; число интервалов ряда наблюдений (число столбцов гистограммы) m ; номинальные значения СКС R_X и X_X , пределы допускаемой относительной случайной погрешности результатов измерений СКС; математическая модель, описывающая зависимость искомого ПКС от СКС. Выходные переменные программы: СКО СКС, СКО искомой величины. Число реализаций определяется в зависимости от требований к точности и заранее неизвестно, оно не должно быть менее 10^6 .

Для построения гистограммы использовалась встроенная функция: «hist(intvis,x)», которая определяет вектор частоты попадания данных в интервалы гистограммы; где «intvis» – вектор, элементы которого задают

сегменты построения гистограммы в порядке возрастания, «a<intvisi<b;x» – вектор случайных данных. Равномерный закон распределения плотности вероятности СКС задавался посредством встроенной функции «runif(x₁,x₂,x₃)». Для вычисления среднеквадратического отклонения использовалась встроенная функция «stdev(x)».

В ходе исследований было принято: $N=10^6$, $R_X=1$ МОм, $X_X=1$ МОм, $m=100$, $\omega=100\pi$ Гц, пределы допускаемой относительной случайной погрешности результатов измерений СКС δR_X и δX_X , тангенса угла диэлектрических потерь $\delta \text{tg}\delta$, тангенса угла фазового сдвига $\delta \text{tg}\phi$, частоты напряжения питания измерительной схемы $\delta\omega$ составляют $\pm 1\%$ номинальных значений и имеют равномерное распределение.

Получены следующие результаты моделирования.

Гистограмма распределения относительной погрешности результата измерения тангенса угла потерь $\text{tg}\delta$ и погрешности результата измерения тангенса угла фазового сдвига

$\delta \text{tg}\phi = \frac{R_X + \Delta R_X}{X_X + \Delta X_X} - \frac{R_X}{X_X}$ имеет форму равнобедренного треугольника. При

принятых номинальных значениях величин СКО обеих ПКС составило 0,008.

Гистограмма распределения относительной погрешности

$$\delta R = \frac{(R_X + \Delta R_X)^2 + (X_X + \Delta X_X)^2}{X_X + \Delta X_X} - \frac{R_X^2 + X_X^2}{X_X}$$

результата измерения сопротивления R резистора эквивалентной схемы имеет форму прямоугольника, т.е. распределение равномерно при СКО составило 0,012 МОм.

Распределение погрешности результата измерения проводимости G

$$\delta G = \frac{(R_X + \Delta R_X)^2}{(R_X + \Delta R_X)^2 + (X_X + \Delta X_X)^2} - \frac{R_X^2}{R_X^2 + X_X^2},$$

так же, как и распределение ΔR , близко к равномерному, СКО составило 2,9 мСм.

Распределение погрешности результата измерения емкости C эквивалентной схемы замещения

$$\delta C = \frac{X_X + \Delta X_X}{(\omega + \Delta\omega) \cdot ((R_X + \Delta R_X)^2 + (X_X + \Delta X_X)^2)} - \frac{X_X}{\omega(R_X^2 + X_X^2)}$$

является нормальным, СКО составило 6,1 пФ.

Плотность распределения вероятностей погрешности

$$\delta \frac{1}{C} = \frac{(\omega + \Delta\omega) \cdot ((X_X + \Delta X_X)^2 + (R_X + \Delta R_X)^2)}{(X_X + \Delta X_X)^2} - \frac{\omega(R_X^2 + X_X^2)}{X_X}$$

распределена нормально, СКО составило 3,6 1/мкФ.

При погрешностях результатов измерений СКС более $\pm 1\%$ гистограммы распределения погрешностей результатов измерений ПКС величин, представленных в таблице 2.1, становятся заметно асимметричными. В этом случае при оформлении результатов измерений необходимо дополнительно указывать коэффициент асимметрии или вид закона распределения.

На рисунке 2.2 представлена гистограмма распределения вероятности погрешности результатов измерений $\tan \delta$ при $\delta R_X = \pm 5\%$, $\delta X_X = \pm 10\%$, СКО = 0,065, коэффициент асимметрии равен 0,163.

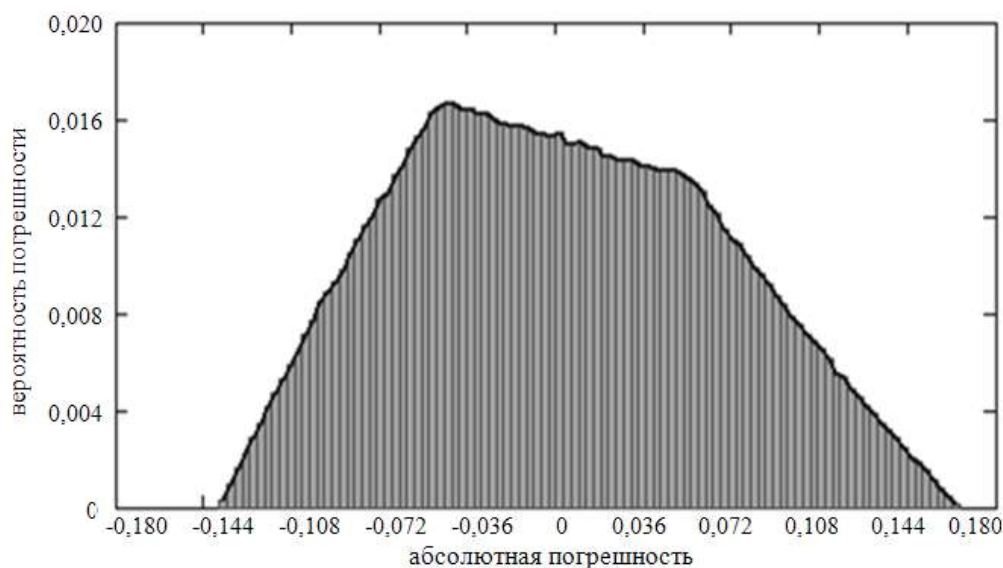


Рисунок 2.2 – Гистограмма плотности распределения вероятностей результатов измерений $tg\delta$ при $\delta R_X = \pm 5\%$, $\delta X_X = \pm 10\%$.

На рисунке 2.3 представлена гистограмма плотности распределения вероятностей погрешности результатов измерений емкости при $\delta R_X = \delta X_X = \pm 7\%$, СКО составил $3,7 \cdot 10^{-5}$ мкФ, коэффициент асимметрии составил 0,152.

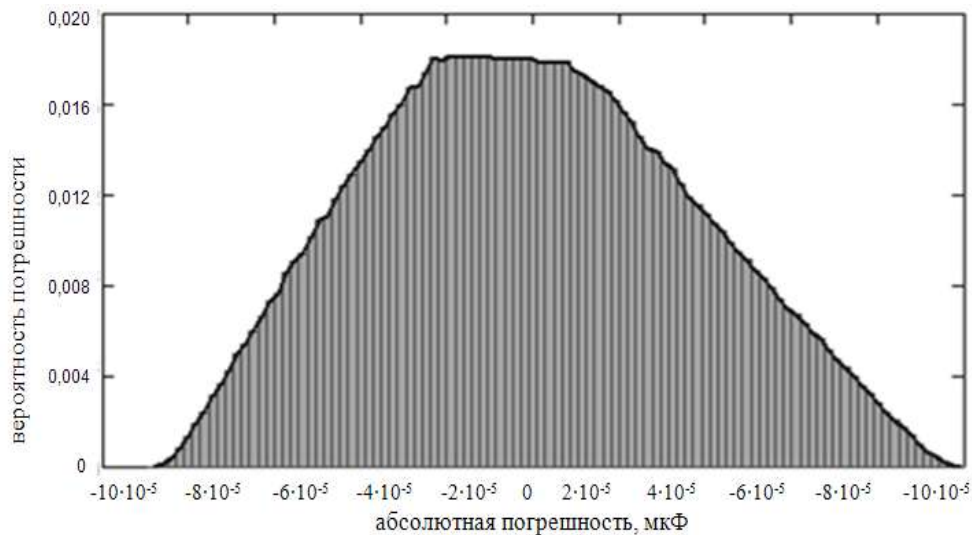


Рисунок 2.3 – Гистограмма плотности распределения вероятностей результатов измерений емкости эквивалентной схемы замещения при $\delta R_X = \delta X_X = \pm 7\%$

На рисунке 2.4 представлена гистограмма плотности распределения вероятностей результатов измерений активного сопротивления эквивалентной схемы замещения при $\delta R_X = \delta X_X = \pm 7\%$. СКО R составило 0,081 МОм, коэффициент асимметрии составил 0,048.

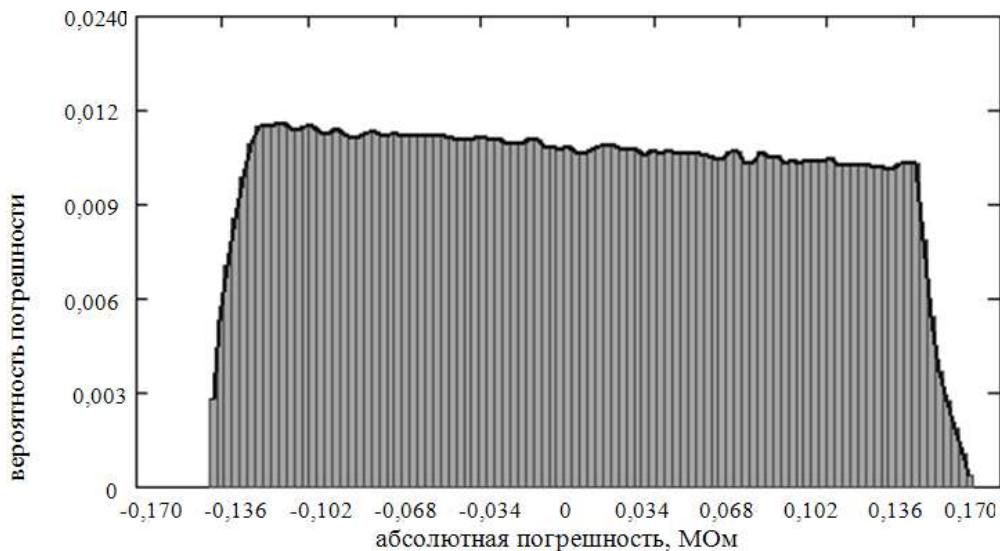


Рисунок 2.4 – Гистограмма плотности распределения вероятностей результатов измерений активного сопротивления эквивалентной схемы замещения при $\delta R_X = \delta X_X = \pm 7\%$.

При исследованиях функциональных свойств гетерогенных объектов на основе их связи с ПКС используются все три модели комплексного сопротивления (1.2)–(1.4). Алгебраическая модель комплексного сопротивления применяется при определении структуры и параметров элементов электрической схемы замещения гетерогенного объекта [75, 76] и при исследовании динамических свойств гетерогенного объекта путем построения диаграммы Найквиста [77, 78]. Тригонометрическая модель применяется при исследовании композитных материалов [79].

Показательная модель комплексного сопротивления является предпочтительной при измерении СКС, поскольку в этом случае измерение может осуществляться серийно выпускаемыми измерительными приборами: вольтметром переменного тока и цифровым фазометром. ПКС алгебраической и тригонометрической модели комплексного сопротивления вычисляются по результатам прямых измерений модуля и аргумента комплексного сопротивления в показательной форме и рассматриваются как результаты косвенных измерений.

В соответствии с международными метрологическими документами результаты измерений обязательно сопровождаются оценками их неопределенности: среднее, стандартная неопределенность, коэффициент

асимметрии, расширенная неопределенность. В случаях, когда результаты измерений используются совместно с другими результатами измерений, стандартная неопределенность рассматривается как точечная характеристика неопределенности результатов измерений. Точечная характеристика неопределенности должна сопровождаться указанием принятой аппроксимации функции плотности вероятности неопределенности результатов. Считается, что функция плотности вероятности неопределенности результатов прямых измерений является симметричной, одномодовой, усеченной.

Формирование оценки неопределенности результатов косвенных измерений основано на гипотезе о распределении вероятностей неопределенности результатов прямых измерений по закону равномерной плотности. Закон равномерной плотности характеризуется наибольшей стандартной неопределенностью из всех типовых законов распределения. Вторая гипотеза заключается в том, что между величинами, измеряемыми прямым методом, и, соответственно, неопределенностями результатов их измерений нет корреляции.

Отсюда возникает задача исследования трансформации закона распределения вероятностей неопределенности результатов прямых измерений модуля и фазы показательной модели комплексного сопротивления в законы распределения вероятностей неопределенности результатов косвенных измерений параметров алгебраической и тригонометрической моделей комплексного сопротивления.

Определение аппроксимации функции плотности вероятности распределения неопределенности результатов измерений аналитическим методом требует громоздких вычислений и геометрических построений. Метод Монте-Карло эффективнее аналитических методов при оценке характеристик неопределенности косвенных, совместных и совокупных измерений путём обработки результатов прямых измерений двух и более величин [80]. Метод Монте-Карло позволяет определять функцию плотности вероятности и оценивать характеристики неопределенности косвенных и совокупных

измерений на основе известных характеристик погрешности прямых измерений. 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 .

Результаты прямых измерений ПКС генерировались с известными пределами расширенной неопределенности $u(z)$ и $u(\varphi)$. Распределения вероятностей этих измерений имеют равномерную плотность. Неопределенности результатов $u(R)$ и $u(X)$ косвенных измерений компонент импеданса в алгебраической форме определяются разностями:

$$u(R) = \frac{z+u(z)}{\sqrt{1+tg(\varphi+u(\varphi))}} - \frac{z}{\sqrt{1+tg\varphi}}, \quad (2.5)$$

$$u(X) = \frac{z+u(z)}{\sqrt{1+ctg(\varphi+u(\varphi))}} - z/\sqrt{1+ctg\varphi}. \quad (2.6)$$

Неопределенности $u(z \cdot \cos\varphi)$ и $u(z \cdot \sin\varphi)$ результатов косвенных измерений параметров комплексного сопротивления тригонометрической модели определяются по формулам:

$$u(z \cdot \cos\varphi) = (z + u(z)) \cdot \cos(\varphi + u(\varphi)) - z \cdot \cos\varphi, \quad (2.7)$$

$$u(z \cdot \sin\varphi) = (z + u(z)) \cdot \sin(\varphi + u(\varphi)) - z \cdot \sin\varphi. \quad (2.8)$$

Проведено моделирование методом Монте-Карло преобразования распределения плотности вероятности результатов измерений параметров комплексного сопротивления при переходе от показательной модели комплексного сопротивления к алгебраической или тригонометрической модели, получены графики функций плотности вероятности результатов косвенных измерений [81].

Алгоритм моделирования имеет следующие характеристики. Входные переменные: количество реализаций M ; количество интервалов ряда результатов измерений (количество столбцов гистограммы) K ; результаты

прямых измерений модуля z и сдвига фаз φ ; пределы расширенной неопределенности результатов измерений модуля импеданса и сдвига фаз импеданса. Выходные переменные программы: среднее значение, стандартная неопределенность, коэффициент асимметрии, расширенная неопределенность. Графики окружающих гистограмм плотности вероятности распределения неопределенности результатов измерений также являются результатом моделирования. Модель имела параметры: $M=106$, $K=100$, $z=1$, $\varphi = 0,1\pi$; $0,25\pi$; $0,4\pi$. Относительные пределы расширенной неопределенности результатов измерений z и φ составляют $\pm 1\%$.

Результаты моделирования представлены в таблице 2.2 и на рисунках 2.5 и 2.6.

Таблица 2.2 – Характеристики неопределенности измерений

Компоненты полного сопротивления	Среднее	Стандартная неопределенность	Коэффициент асимметрии	Расширенная неопределенность, $\pm$
$\varphi = 0,1\pi$				
Z	$8,97 \cdot 10^{-6}$	$5,77 \cdot 10^{-3}$	$-1,60 \cdot 10^{-3}$	$9,5 \cdot 10^{-3}$
φ	$6,49 \cdot 10^{-7}$	$1,81 \cdot 10^{-3}$	$-1,60 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$
R	$7,92 \cdot 10^{-6}$	$5,06 \cdot 10^{-3}$	$-1,10 \cdot 10^{-3}$	$8,4 \cdot 10^{-3}$
X	$2,45 \cdot 10^{-6}$	$3,08 \cdot 10^{-3}$	$2,69 \cdot 10^{-3}$	$5,5 \cdot 10^{-3}$
$z \cos \varphi$	$6,77 \cdot 10^{-6}$	$5,52 \cdot 10^{-3}$	$-1,32 \cdot 10^{-3}$	$9,1 \cdot 10^{-3}$
$z \sin \varphi$	$2,89 \cdot 10^{-6}$	$2,48 \cdot 10^{-3}$	$9,83 \cdot 10^{-3}$	$4,7 \cdot 10^{-3}$
$\varphi = 0,25\pi$				
Z	$8,97 \cdot 10^{-6}$	$5,77 \cdot 10^{-3}$	$-1,60 \cdot 10^{-3}$	$9,5 \cdot 10^{-3}$
φ	$4,89 \cdot 10^{-7}$	$4,54 \cdot 10^{-3}$	$-3,21 \cdot 10^{-4}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$
R	$4,34 \cdot 10^{-6}$	$4,38 \cdot 10^{-3}$	$2,57 \cdot 10^{-3}$	$7,9 \cdot 10^{-3}$
X	$4,71 \cdot 10^{-6}$	$4,39 \cdot 10^{-3}$	$3,82 \cdot 10^{-3}$	$7,9 \cdot 10^{-3}$
$z \cos \varphi$	$-1,31 \cdot 10^{-6}$	$5,19 \cdot 10^{-3}$	$8,33 \cdot 10^{-3}$	$9,8 \cdot 10^{-3}$
$z \sin \varphi$	$-5,76 \cdot 10^{-7}$	$5,19 \cdot 10^{-3}$	$9,77 \cdot 10^{-3}$	$9,8 \cdot 10^{-3}$
$\varphi = 0,4\pi$				
Z	$8,97 \cdot 10^{-6}$	$5,77 \cdot 10^{-3}$	$-1,60 \cdot 10^{-3}$	0,01
φ	$9,49 \cdot 10^{-7}$	$7,25 \cdot 10^{-3}$	$-3,10 \cdot 10^{-4}$	0,012
R	$-3,47 \cdot 10^{-5}$	$5,43 \cdot 10^{-3}$	$2,45 \cdot 10^{-3}$	0,01
X	$1,39 \cdot 10^{-5}$	$5,66 \cdot 10^{-3}$	$5,67 \cdot 10^{-3}$	0,01
$z \cos \varphi$	$-6,26 \cdot 10^{-6}$	$7,13 \cdot 10^{-3}$	$6,59 \cdot 10^{-3}$	0,012
$z \sin \varphi$	$-1,62 \cdot 10^{-5}$	$5,93 \cdot 10^{-3}$	$1,42 \cdot 10^{-3}$	0,011

Графики распределений плотности вероятности неопределенности результатов измерений параметров алгебраической и тригонометрической моделей представлены на рисунках 2.5, 2.6 соответственно.

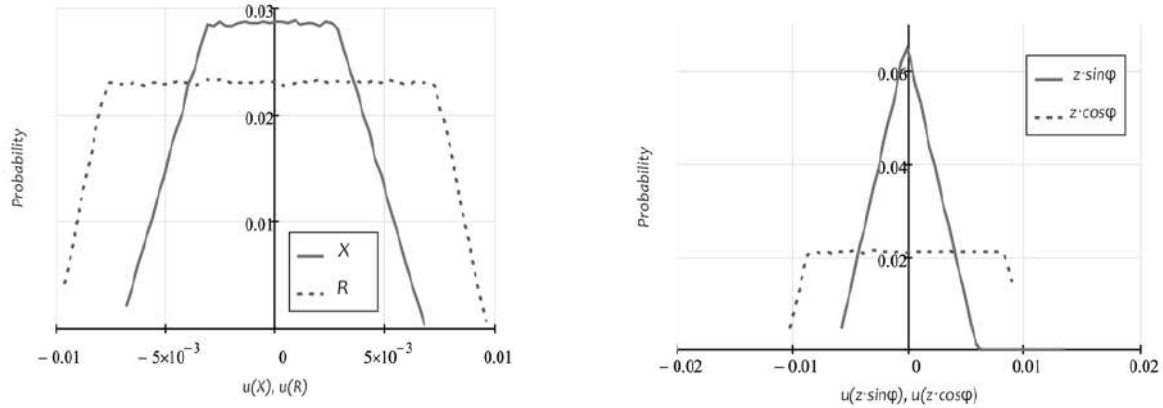


Рисунок 2.5 – Распределение плотности вероятности неопределенности результатов измерения параметров комплексного сопротивления алгебраической и тригонометрической модели комплексного сопротивления при сдвиге фаз $\varphi = 0.1\pi$.

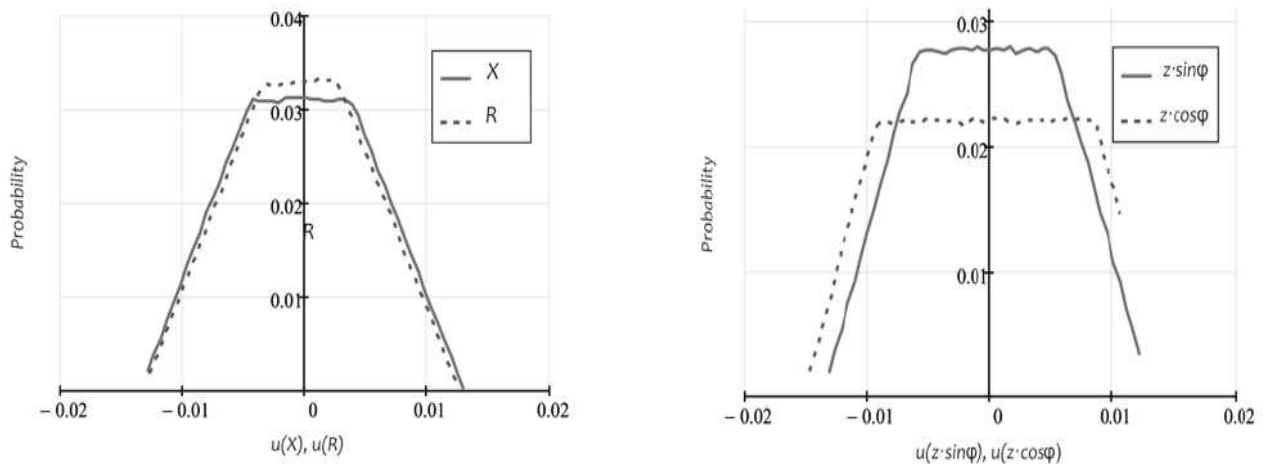


Рисунок 2.6 – Распределение плотности вероятности неопределенности результатов измерения параметров комплексного сопротивления алгебраической и тригонометрической модели комплексного сопротивления при сдвиге фаз $\varphi = 0.4\pi$.

Анализ результатов моделирования трансформации распределений позволил сделать следующие выводы.

1 Коэффициент асимметрии во всех случаях не превышает 10^{-2} , поэтому все распределения следует считать симметричными и соответствуют требованиям стандарта.

2 Смещение среднего всех распределений относительно средних прямых измерений пренебрежимо мало по сравнению с точечными оценками неопределенности измерений.

3 Стандартная и расширенная неопределенность распределений плотности вероятности неопределенности результатов косвенных измерений меньше соответствующих характеристик неопределенности результатов прямых измерений параметров алгебраической модели.

4 Распределения плотности вероятности неопределенности результатов измерений параметров комплексного сопротивления алгебраической модели имеют вид трапеции. При $\varphi=0,25\pi$ распределения составляющих комплексного сопротивления совпадают. Стандартная неопределенность активной составляющей комплексного сопротивления становится меньше стандартной неопределенности реактивной составляющей при $\varphi < 0,4\pi$, обратное верно $\varphi > 0,4\pi$.

5 Распределение плотности вероятности неопределенности результатов измерений параметров комплексное сопротивление тригонометрической модели трансформируется из трапеции в треугольник при уменьшении аргумента φ . Распределения одинаковы при $\varphi = 0,4\pi$. Стандартная неопределенность активной составляющей комплексного сопротивления тригонометрической модели больше стандартной неопределенности реактивной компоненты при изменении аргумента φ в диапазоне $\varphi < 0,4\pi$, обратное верно при $\varphi > 0,4\pi$.

6 Стандартная неопределенность распределений отличается в 1,5–2 раза для результатов измерений параметров комплексного сопротивления алгебраической и тригонометрической моделей при значениях аргумента $\varphi = 0,1\pi$ и $\varphi = 0,4\pi$. Такие различия нельзя считать несущественными.

7 Равенство функций плотности вероятности результатов измерений компонент импеданса в индикативной форме не обеспечивает равенства этих функций для компонент импеданса в других формах. Отношение стандартных неопределенностей компонент в некоторых случаях превышает 2.

Таким образом, моделирование методом Монте-Карло позволяет определить распределения и точечные числовые характеристики трансформированных распределений плотности вероятности неопределенности результатов измерений параметров комплексного сопротивления при переходе от показательной модели комплексного сопротивления к алгебраической или тригонометрической модели. Установлено, что стандартная неопределенность результатов косвенных измерений параметров алгебраической и показательной формах существенно различается при различных соотношениях значений модуля и сдвига фазы импеданса в индикативной форме. Следовательно, оценивание точечных числовых характеристик неопределенности результатов измерений параметров комплексного сопротивления методом Монте-Карло следует производить для каждого результата измерения параметров алгебраической и тригонометрической моделей комплексного сопротивления.

Таким образом, метод Монте-Карло является эффективным инструментом оценивания характеристик случайных погрешностей косвенных, совокупных и совместных измерений при любых законах распределения вероятностей погрешности результатов прямых измерений, в частности, среднего квадратического отклонения результатов измерений ПКС, определяющих качество высоковольтных электроизоляторов: электрическая емкость или обратная ей величина, активное электрическое сопротивление или проводимость, тангенс угла потерь или тангенс угла фазового сдвига. Распределение вероятностей погрешности результатов измерений этих величин по значениям составляющих комплексного сопротивления, полученным с относительными погрешностями менее $\pm 1\%$ с равномерным распределением вероятностей погрешности результатов измерений, является треугольным (тангенс угла потерь, тангенс угла фазового сдвига), равномерным (активное электрическое сопротивление или проводимость) или нормальным (электрическая емкость и обратная ей величина). При относительных погрешностях результатов измерений составляющих комплексного сопротивления, превышающих $\pm 1\%$, распределения вероятностей погрешности

результатов измерений искомых величин становятся заметно асимметричными. В таких случаях при оформлении результатов измерений необходимо дополнительно указывать коэффициент асимметрии или вид закона распределения вероятностей погрешности.

Моделирование методом Монте-Карло также позволяет оценить весовые коэффициенты составляющих систематической погрешности измерения ПКС по смещению центра распределения оценок погрешности измерения искомого ПКС относительно номинального значения.

2.2 УНИВЕРСАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КОМПЛЕКСНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННОГО ОБЪЕКТА В РАБОЧИХ РЕЖИМАХ

Обобщенное уравнение мостовой цепи, предложенное К. Б. Карандеевым и Г. А. Штамбергером, устанавливает связь комплексного сопротивления двухполюсной электрической цепи (ДЭЦ), включенной в мостовую измерительную схему, и отношения двух активных параметров этой схемы (синусоидальных напряжений или токов) [75]:

$$\dot{W} = W_R + jW_I = |\dot{W}|e^{j\varphi} = \frac{\dot{a}\dot{Z}_X + \dot{b}}{\dot{c}\dot{Z}_X + \dot{d}}, \quad (2.9)$$

где $\dot{W}$ – отношение комплексных напряжений (токов); $\dot{Z}_X = R_X + jX_X$ – измеряемое комплексное сопротивление ДЭЦ с активной R_X и реактивной X_X составляющими; $\dot{a}, \dot{b}, \dot{c}, \dot{d}$ – известные комплексные коэффициенты, определяемые комплексными сопротивлениями опорных ДЭЦ измерительной схемы; W_R, W_I – активная и реактивная составляющие отношения $\dot{W}$, $|\dot{W}|, \varphi$ – модуль и аргумент отношения $\dot{W}$, соответственно. Комплексное отношение $\dot{W}$ может быть безразмерным отношением однородных величин (напряжения или токи измерительной схемы) или размерным отношением неоднородных величин (напряжение и ток) с размерностью сопротивления или проводимости.

Кроме мостовых измерительных схем, обобщенное уравнение описывает измерительные схемы в виде делителя напряжения (полумостовые или последовательные), параллельные, параллельно – последовательные и минимальную измерительную схему в виде исследуемой ДЭЦ [69]. При отсутствии опорных элементов обобщенное уравнение мостовой цепи вырождается в закон Ома для участка цепи в комплексной форме. В этом случае измерение СКС ДЭЦ можно осуществить путем измерения трех величин: напряжение, ток и фазовый сдвиг между ними. Наличие в измерительной схеме опорных ДЭЦ позволяет проводить прямые измерения СКС ДЭЦ методом уравнивающего преобразования, а при косвенных измерениях выполнять прямые измерения только двух неоднородных величин: амплитудное или действующее значение напряжения и фазовый сдвиг между синусоидальными напряжениями.

Измерение СКС ДЭЦ на основе решения обобщенного уравнения состоит в преобразованиях измеряемых величин и известных сопротивлений опорных ДЭЦ в активные параметры измерительной схемы (напряжение, ток), прямых измерениях этих активных параметров или их сравнениях с заданными значениями и вычислении по результатам этих операций значений искомых величин как корней обобщенного уравнения. Каждая из операций, составляющих измерение, имеет ряд вариантов реализации. Различные сочетания этих вариантов порождают множество возможных способов измерения СКС ДЭЦ, однако в любом случае необходимо решать обобщенное уравнение относительно двух неизвестных. Именно выбранный способ решения уравнения определяет структуру измерительного устройства и алгоритм измерения, и, следовательно, уровень его метрологических характеристик. Поэтому способ решения обобщенного уравнения мостовой цепи может выступать как основа систематизации способов измерения СКС ДЭЦ.

Способы решения обобщенного уравнения можно разделить на способы, основанные на варьировании коэффициентов обобщенного уравнения, и

способы, основанные на использовании фиксированных значений коэффициентов.

1 Способы решения на основе варьирования коэффициентов

1.1 Способ решения на основе формирования определенного значения отношения. Осуществляется варьирование коэффициентов $\dot{a}, \dot{b}, \dot{c}, \dot{d}$ до приведения комплексного отношения $\dot{W}$ к определенному значению $\dot{W} = \dot{W}_0$. Достижение отношением $\dot{W}$ значения $\dot{W}_0$ фиксируется путем непосредственного сравнения или измерительного контроля величин, формирующих это отношение. Неизвестные СКС R_X и X_X находятся затем как решения системы уравнений $W_{R0} = eR_X$ и $W_{X0} = fX_X$, где e и f – действительные функции коэффициентов $\dot{a}_0, \dot{b}_0, \dot{c}_0, \dot{d}_0$.

1.2 Способ решения на основе исключения одного неизвестного. Осуществляется варьирование коэффициентов $\dot{a}, \dot{b}, \dot{c}, \dot{d}$ до поочередного достижения функциями коэффициентов сочетаний значений $e = 0, f \neq 0$ и $e \neq 0, f = 0$. При этом обобщенное уравнение поочередно вырождается в уравнение с одним неизвестным X_X и R_X соответственно.

2 Способы решения на основе фиксированных значений коэффициентов

2.1 Способ решения на основе одного значения коэффициентов и двух параметров отношения

Производится присвоение коэффициентам обобщенного уравнения $\dot{a}, \dot{b}, \dot{c}, \dot{d}$ фиксированных значений $\dot{a} = a_1, \dot{b} = b_1, \dot{c} = c_1, \dot{d} = d_1$. При известных модуле и аргументе комплексного отношения $\dot{W}$ неизвестные СКС находятся путем решения системы двух уравнений, формируемой из уравнения модулей и уравнения аргументов отношения $\dot{W}$.

2.2 Способ решения на основе двух значений коэффициентов и одного параметра отношения.

Формируются два обобщенных уравнения, отличающихся значениями коэффициентов:

$$\dot{W}_1 = \frac{\dot{a}_1 \dot{Z}_X + \dot{b}_1}{\dot{c}_1 \dot{Z}_X + \dot{d}_1}, \quad \dot{W}_2 = \frac{\dot{a}_2 \dot{Z}_X + \dot{b}_2}{\dot{c}_2 \dot{Z}_X + \dot{d}_2}. \quad (2.10)$$

Для нахождения неизвестных значений СКС необходимо задаться только модулями или только аргументами отношений $\dot{W}$ и решить относительно составляющих $\dot{Z}_X$, соответственно, систему квадратных или трансцендентных уравнений.

Исторически первый способ измерения СКС ДЭЦ, способ уравнивающего преобразования, реализует способ решения обобщенного уравнения путем варьирования коэффициентов и сравнения текущего значения отношения с его заданным значением. Заданному состоянию измерительной схемы $W=1$ соответствует способ полного уравнивания [75]. При приведении схемы к другим значениям $\dot{W}_0$ имеет место квазиуравнивающее преобразование. Процесс варьирования коэффициентов может осуществляться различными методами и требует оптимизации, которая может быть осуществлена методом координированного уравнивания [53].

Способы измерений СКС, основанные на решении обобщенного уравнения путем исключения из уравнения одной из двух искоемых составляющих, разработаны Г.А. Штамберггером [54].

Решение обобщенного уравнения способом использования двух значений коэффициентов $\dot{a}$, $\dot{b}$, $\dot{c}$, $\dot{d}$ и одного параметра отношения реализовано в способе измерения СКС ДЭЦ и напряжения на ней [72], где в качестве информативного параметра комплексного отношения $\dot{W}$ используется его модуль $|\dot{W}|$.

Выявление способов решения обобщенного уравнения, перспективных для использования в качестве математических моделей алгоритма функционирования средств измерений СКС гетерогенных объектов в рабочих режимах эксплуатации, следует проводить на основе следующих положений:

1. Способ решения обобщенного уравнения измерения СКС должен быть инвариантным по отношению к структуре ДЭЦ. Идентификация структуры ДЭЦ по результатам измерений СКС [76] осуществляется путём синтеза соответствующей математической модели в составе комбинированной модели процесса измерения ПКС объекта исследования.

2. Способ решения обобщенного уравнения измерения СКС должен обеспечивать реализацию средства измерений с минимальными аппаратными затратами в смысле необходимого количества состояний опорных ДЭЦ и числа измеряемых и (или) сравниваемых величин. При этом считается, что измерение требует таких же аппаратных затрат, что и сравнение.

3 Объем и погрешность вычислений не являются ограничивающими факторами для использования того или иного способа решения обобщенного уравнения измерения СКС при реализации математической модели процесса измерения параметров гетерогенных объектов в рабочих режимах в связи с быстрым развитием средств вычислительной техники и их широким внедрением в средства измерений ПКС [58].

Исходя из сформулированных положений, наиболее перспективными для создания средств измерений СКС гетерогенных объектов в рабочих режимах следует считать способы решения обобщенного уравнения измерения СКС на основе фиксированных значений коэффициентов в различных модификациях. Способы данной группы требуют для своей реализации минимального, начиная с одного, числа различных значений коэффициентов обобщенного уравнения, аппаратно реализуемых путём организации соответствующего числа состояний измерительной схемы. Важнейшим их достоинством при разработке средств измерений СКС является отсутствие необходимости в многозначных мерах пассивных электрических величин.

Обобщенное уравнение мостовой цепи Карандеева – Штамбергера не может использоваться как уравнение измерения ПКС гетерогенного объекта в рабочих режимах, так как оно не содержит в качестве параметров амплитуду и частоту синусоидального напряжения на объекте измерения, температуру

объекта и другие физические величины, определяющие рабочие режимы гетерогенного объекта. В связи с этим, в качестве уравнения измерения ПКС гетерогенного объекта в рабочих режимах предложено уравнение

$$\dot{W} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} = \frac{\dot{a}(\omega_1, \omega_2) \cdot \dot{Z}_X(\omega_1, \Theta_1, U_1) + \dot{b}(\omega_1, \omega_2)}{\dot{c}(\omega_1, \omega_2) \cdot \dot{Z}_X(\omega_2, \Theta_2, U_2) + \dot{d}(\omega_1, \omega_2)}, \quad (2.11)$$

где $\dot{U}_1 = U_{m1} \sin(\omega_1 t + \phi_1)$ – 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, $\dot{U}_2 = U_{m2} \sin(\omega_2 t + \phi_2)$ – 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 комплексным 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.

Введение в уравнение измерения ПКС в качестве переменной круговой частоты ω позволяет дополнить совокупность возможных способов решения обобщенного уравнения измерения ПКС способом измерения с организацией двух состояний измерительной схемы за счет использования двух значений ω_1

и ω_2 частоты синусоидального напряжения на объекте измерения. Достоинством этого способа является неизменность структуры измерительной схемы при переходе от одного состояния к другому.

Измерения, помимо СКС, амплитуды и частоты синусоидального напряжения, температуры и других величин, определяющих рабочий режим гетерогенного объекта, большой объем вычислительных операций, исключает возможность, с учётом требования универсальности, реализации средства измерений ПКС гетерогенного объекта в рабочих режимах в виде автономного измерительного прибора. Такое средство измерений может быть реализовано как многоканальная информационно-измерительная система, имеющая в своём составе сложный измерительный канал измерения составляющих нелинейного комплексного сопротивления, канал измерения частоты синусоидального напряжения и канал измерения температуры с возможностью дополнения каналами измерения других величин, определяющих рабочий режим гетерогенного объекта.

2.3 РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ ПРОЦЕССА ИЗМЕРЕНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ НЕЛИНЕЙНОГО КОМПЛЕКСНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Теоретической основой разработки структуры процесса измерения составляющих нелинейного комплексного сопротивления явилось предложенное профессором Г.П. Шлыковым представлении о процессе измерения физической величины как совокупности операций воспроизведения единицы измерения измеряемой физической величины, масштабирования к масштабным коэффициентом больше или меньше 1 единицы измеряемой величины или самой измеряемой величины, сравнения, прямого или опосредованное, размерных или безразмерных отношений с единицей измерения величины, поиска отметки на шкале отношений, наиболее близкой размеру измеряемой величины, управляемого результатом операции сравнения, и приписывания полученному безразмерному числу единицы измерения измеряемой величины. Выполнение этих операций позволяет получить

значение измеряемой физической величины путём решения основного уравнения измерения физической величины.

«Для шкал отношений уравнение измерения физической величины может быть представлено в виде

$$N_x = \frac{x}{1_x}, \quad (2.12)$$

где N_x – число (целое или дробное), которое должно быть получено по завершению процесса измерения; x – измеряемая величина, обладающая некоторым размером, присущим конкретному объекту; 1_x – величина, принятая за единицу данной измеряемой величины x » [77].

Из основного уравнения измерения Г.П. Шлыковым получены 4 варианта разностного уравнения измерения, которые являются математическими моделями вариантов структуры процесса измерения физической величины:

$$x - N_x \cdot 1_x = 0; \quad \frac{x}{N_x} - 1_x = 0; \quad \frac{x}{1_x} - N_x = 0; \quad \frac{x}{1_x N_x} - 1 = 0. \quad (2.13)$$

Разностное уравнение отражает суть процесса измерения, состоящую в сравнении, которое моделируется операцией вычитания, неизвестного размера измеряемой величины с известным размером физической величины: единицей измерения этой величины при прямых измерениях или единицей измерения другой величины принятой системы единиц физических величин. Подбором числа N_x достигается минимальное значение разности, в идеальном случае – нулевое. Число N_x , обеспечивающее минимум разности, принимается за безразмерное число, совместно с приписываемой размерностью образующее значение измеряемой величины. Подбор числа N_x требует перебора меньшего количества вариантов, т.е. происходит быстрее, если начальный известный размер близок к измеряемому размеру. Близость измеряемого и известного размеров достигается выполнением операции масштабирования.

Уравнение измерения модуля комплексного сопротивления имеет вид

$$N_Z = \frac{z_X / 1_Z}{z_0 / 1_Z}, \quad (2.14)$$

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 [70].

Единица 1_Z комплексного сопротивления может воспроизводиться в одной из трех форм: $1_{ZR}[Ом] = 1_{ZC}[\Gamma\varphi^{-1} \cdot \Phi^{-1}] = 1_{ZL}[\Gamma\varphi \cdot \Gammaн]$, 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. Размерность, приписываемая значениям составляющих комплексного сопротивления, указывает, что они получены при приложении к объекту измерения синусоидального напряжения и, для обеспечения единства измерений, должны сопровождаться значениями величин, составляющих размерность (частота синусоидального напряжения, активное сопротивление, емкость, индуктивность) и влиявших на объект исследования в процессе измерения (действующее значение напряжения, температура).

Конкретизация общего уравнения измерения комплексного сопротивления к задаче разработки универсального средства измерений ПКС состоит в следующем:

1 При измерении пассивной величины всегда имеет место ее преобразование в активную величину для реализации операции «сравнение». Следовательно, перечень обязательных операций процесса измерения необходимо дополнить операцией «Измерительное преобразование СКС объекта измерения в активную электрическую величину»;

2 Специфика измерения ПКС проявляется только тогда, когда одновременно измеряются два параметра [8]. Измерения могут быть совокупными (измеряемые ПКС имеют одинаковую размерность), например,

активная и реактивная СКС, или совместными (преобразуемые параметры имеют разную размерность), например, емкость конденсатора и активное сопротивление резистора двухэлементной МДЭЦ.

В связи с необходимостью преобразования не менее двух величин ни одна из моделей (2.5), описывающих процесс измерения одной величины, непосредственно не может быть моделью процесса измерения СКС. Сравнительный анализ моделей (2.5) показывает, что в качестве теоретической основы для разработки универсального средства измерений ПКС предпочтительны два последних варианта, включающие операцию «Определение отношения», которая выполняется в ходе аналого-цифрового преобразования активной электрической величины, в большинстве случаев, напряжения. Это открывает возможность выполнять операцию «Сравнение» в цифровой форме, что не требует физического воспроизведения единицы искомой величины.

Одновременное преобразование двух ПКС на основе модели преобразователя с алгебраической формой представления комплексной величины $\dot{Z} = R + jX$ можно рассматривать как совокупное преобразование однородных величин R и X , имеющих размерность [Ом], а при использовании модели с показательной формой представления $\dot{Z} = ze^{j\phi}$ - как совместные измерения разнородных величин: электрического сопротивления z и фазового сдвига ϕ . Для достижения универсальности средства измерений ПКС необходимо снять различие между совокупными и совместными измерениями в отношении размерности путем сведения измерений всех ПКС к совокупным измерениям. Данная задача решается путем перехода от преобразования абсолютных величин к преобразованию относительных безразмерных величин. Показательная форма комплексного числа представляется более предпочтительной, поскольку фазовый сдвиг ϕ является относительной величиной:

$$\phi = \frac{2\pi\Delta T}{T} = \omega\Delta T \quad (2.15)$$

где ΔT – длительность интервала времени между равными мгновенными фазами синусоидального сигнала, T – длительность периода синусоидального напряжения с круговой частотой ω на объекте измерения.

Измерение фазового сдвига ϕ как составляющей комплексного сопротивления в показательной форме осуществляется путем преобразования в код длительности ΔT интервала времени между равными мгновенными фазами синусоидального напряжения с частотой ω и напряжения на опорном элементе измерительной схемы. Результаты этого преобразования, код $N_{\Delta T} = \Delta T / 1_T$ и код $N_T = T / 1_T$ периода T напряжения, используются для формирования кода $N_\phi = 2\pi N_{\Delta T} / N_T$ фазового сдвига ϕ .

Отличительной особенностью совокупных измерений двух и более величин является математическая модель преобразования в виде системы уравнений измерений, число которых не должно быть меньше числа измеряемых величин [71].

Математическая модель совместных измерений СКС представляет собой систему двух уравнений:

$$\begin{cases} \sqrt{N_R + N_X} = N_Z \\ \frac{N_X}{N_R} = \operatorname{tg} N_\phi \end{cases} . \quad (2.16)$$

Операция «Поиск по шкале» заключается в решении данной системы уравнений относительно N_R и N_X . Результаты измерения СКС формируются путем выполнения над кодами N_X и N_Y операции «Приписывание размерности».

Процесс измерения, осуществляемый универсальным средством измерений ПКС, можно разделить на следующие этапы:

– составление измерительной схемы путём подсоединения к объекту измерения одного или нескольких, в зависимости от выбранной структуры, опорных элементов;

- подключение источника синусоидального напряжения к измерительной схеме;
- измерения параметров напряжений на элементах измерительной схемы: амплитуды напряжения на опорном элементе и фазового сдвига напряжений;
- вычисление кодов СКС на основе результатов измерений параметров выходных напряжений измерительной схемы и значению частоты синусоидального напряжения;
- вычисление кода искомого ПКС по кодам СКС;
- формирование результата измерения ПКС путем приписывания безразмерному коду соответствующей физической размерности.

Структурная модель процесса преобразования выходных напряжений измерительной схемы в составляющие R_X и X_X комплексного сопротивления $\dot{Z}_X$ и частоту синусоидального напряжения, приложенного к объекту измерения, представлена на рисунке 2.5.

Объект измерения с комплексным сопротивлением и опорный элемент с комплексным сопротивлением образуют предварительный преобразователь, построенный по схеме делителя напряжения. Опорный элемент составляется из однозначных и (или) многозначных мер пассивных электрических величин, воспроизводящих их единицы.

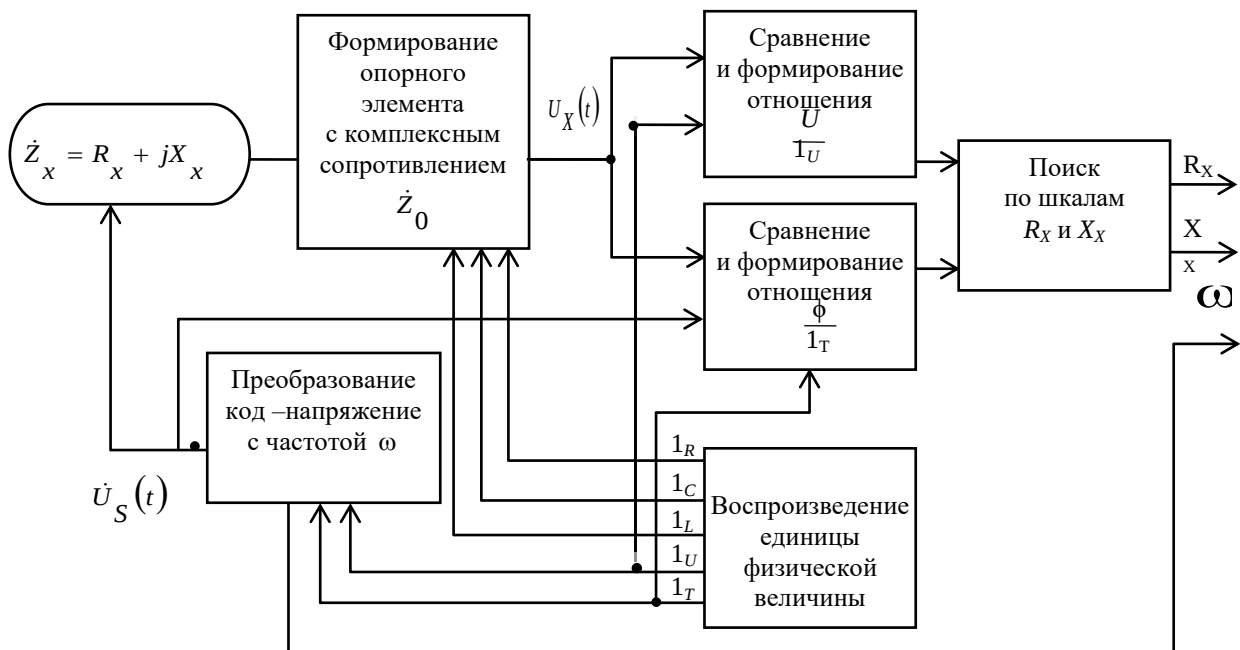


Рисунок 2.5 – Структурная модель процесса преобразования выходных напряжений измерительной схемы в составляющие R_X и X_X комплексного сопротивления $\dot{Z}_X$ и частоту синусоидального напряжения, приложенного к объекту измерения

Синусоидальное напряжение, прилагаемое к предварительному преобразователю, формируется на основе воспроизведения единиц напряжения и времени. Генерирование синусоидального напряжения осуществляется в современных средствах измерений программными средствами с использованием преобразователя код-напряжение.

Над выходным напряжением $\dot{U}_X(t)$ измерительной схемы выполняются операции формирования отношений $U_m / 1_U$ и $\phi / 1_T$.

В задачах, где требуется определение трех и более ПКС, дополнительные уравнения преобразования могут синтезироваться следующими способами:

- изменение комплексного сопротивления опорного элемента предварительного преобразователя;
- изменение частоты синусоидального напряжения, приложенного к объекту.

Современные средства измерений все чаще имеют режим метрологического самоконтроля (самоповерки [57]). Наличие группы мер пассивных электрических величин, рассматриваемых как меры комплексного сопротивления, позволяет организовать автокалибровку вторичного измерительного преобразователя с использованием тех мер, которые не включены в конкретную схему предварительного преобразования.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

1 Разработана модель объекта измерения для измерения функциональных параметров гетерогенного объекта в рабочих режимах, представляющая собой комбинацию универсальной электрической модели в виде пассивного электрического элемента с комплексным сопротивлением и специализированной математической модели в виде совокупности уравнений связи составляющих комплексного сопротивления электрического элемента и искомых параметров гетерогенного объекта, что открывает возможность

унификации средств измерений параметров комплексного сопротивления при одновременном расширении их функциональных возможностей и области применения при измерениях параметров гетерогенных объектов в рабочих режимах.

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.

3 Метод Монте –Карло (метод статистических испытаний) позволяет оценивать трансформацию распределений случайных погрешностей прямых измерений составляющих комплексного сопротивления при измерениях искомых параметров комплексного сопротивления на основе комбинированной модели гетерогенного объекта в рабочих режимах.

4 Разработана структура процесса измерения составляющих нелинейного комплексного сопротивления на основе прямых измерений падения напряжения на опорном элементе измерительной схемы и фазового сдвига напряжений в узлах пассивной измерительной схемы. Структура процесса измерения составляющих нелинейного комплексного сопротивления может выступать теоретической основой разработки измерительной схемы устройства для измерения составляющих нелинейного комплексного сопротивления гетерогенного объекта с учётом влияющих величин, определяющих рабочий режим.

ГЛАВА 3

ФОРМИРОВАНИЕ СОВОКУПНОСТИ БАЗОВЫХ СТРУКТУР УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ КОМПЛЕКСНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ И НАПРЯЖЕНИЯ НА ОБЪЕКТЕ ИЗМЕРЕНИЯ

В данной главе проведена систематизация возможных вариантов структуры процесса совместных измерений СКС и напряжения на объекте измерения. По результатам систематизации разработаны варианты структуры устройства для измерения составляющих комплексного сопротивления и напряжения на объекте измерения методом прямого преобразования на основе делителя напряжения и неуравновешенной мостовой схемы. По результатам систематизации сформирована совокупность базовых структур измерительных устройств, включая структуры с питанием измерительной схемы от источника синусоидального напряжения с ненормированными метрологическими характеристиками. Составлены рекомендации по выбору из базы оптимальной структуры при решении конкретной измерительной задачи с учётом рабочих режимов функционирования гетерогенного объекта.

Основные результаты исследований, представленные в данной главе, опубликованы в работах [4, 6, 69, 85–87].

3.1 СИСТЕМАТИЗАЦИЯ СТРУКТУР ПРОЦЕССА СОВМЕСТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СОСТАВЛЯЮЩИХ КОМПЛЕКСНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ И НАПРЯЖЕНИЯ НА ОБЪЕКТЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Обязательным этапом проектирования средства измерений СКС и напряжения на объекте измерения является определение структуры процесса измерения, включающее выбор измерительной схемы, образованной объектом измерения, опорными и коммутирующими элементами и определение активных измеряемых величин (напряжение и/или фазовый сдвиг напряжений).

Измерительная схема в виде неуравновешенного моста или делителя напряжения подключается к источнику синусоидального напряжения. Напряжения в узлах измерительной схемы определяются значениями СКС объекта измерения, СКС опорных элементов, амплитудой и частотой напряжения питания.

Взаимосвязь структур процесса совместных измерений СКС и напряжения на объекте измерения представлена на рисунке 3.1 в виде древовидного графа.

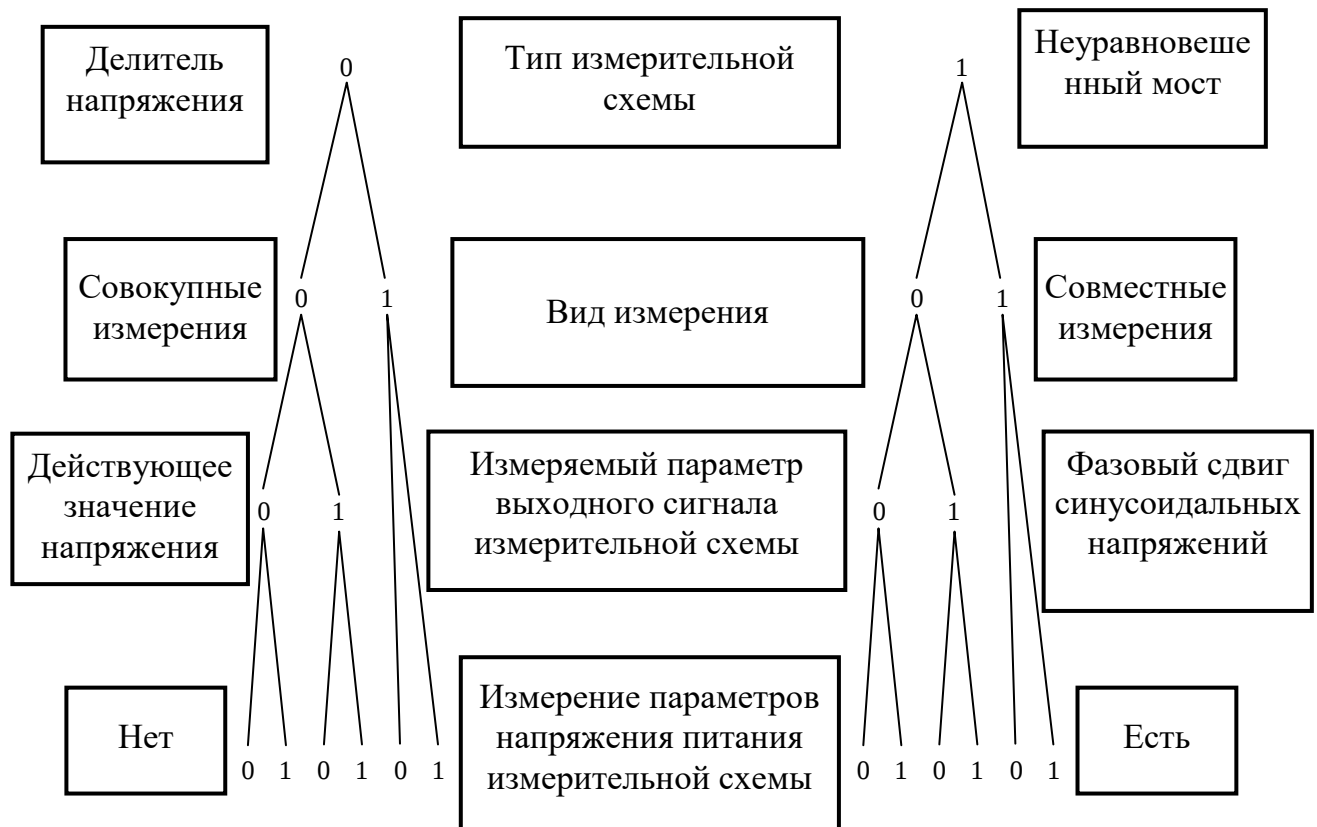


Рисунок 3.1 – Систематизация структур процесса совместных измерений СКС и напряжения на объекте измерения

Первым признаком ветвления является тип измерительной схемы: неуравновешенный мост или делитель напряжения. Второй признак ветвления – вид измерения. На этом этапе осуществляется выбор варианта реализации процесса измерения СКС между совокупными и совместными измерениями

параметров выходного сигнала измерительной схемы. число измеряемых параметров выходного сигнала измерительной схемы в каждом ее состоянии. Возможно прямое измерение обоих параметров выходного сигнала (амплитудное значение напряжения на опорном элементе, фазовый сдвиг напряжений в узлах измерительной схемы) или только одного из этих параметров.

Третий признак ветвления графа определяет число (одна или две величины) и вид измеряемого параметра выходного сигнала измерительной схемы. Четвертый признак ветвления графа определяет вариант реализации процесса измерения СКС и напряжения на объекте измерения при питании измерительной схемы устройства в рабочем режиме от источника синусоидального напряжения с ненормированными метрологическими характеристиками, например, напряжения промышленной электрической сети: допустимыми погрешностями генерирования амплитуды и/или частоты синусоидального напряжения.

Модели 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 (напряжение, фазовый сдвиг). Возможности измерения параметров падения напряжения на объекте измерения при реализации способов измерения с прямым измерением одной величины (00) ограничены, без дополнительных аппаратных и алгоритмических затрат, 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 питания измерительной схемы.

3.2 БАЗОВЫЕ СТРУКТУРЫ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ КОМПЛЕКСНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ И НАПРЯЖЕНИЯ НА ОБЪЕКТЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Систематизация структур процесса совместных измерений СКС и напряжения на объекте измерения позволила установить, что полную базу вариантов структуры устройства для измерения составляющих комплексного сопротивления и напряжения на объекте измерения для трёх первых уровней ветвления графа составляют шесть структур. Базовые системы уравнений преобразования и структуры устройств для измерений СКС и напряжения на объекте измерения методом прямого преобразования на основе мостовой измерительной схемы и измерительной схемы в виде делителя напряжения представлены, соответственно, в таблицах 3.1 и 3.2.

В структуры на основе делителя напряжения с прямым измерением фазового сдвига напряжений (01) и (001) введен трансформатор напряжения ТН как источник синусоидального напряжения, частота которого равна частоте напряжения питания измерительной схемы, что позволяет измерять фазовый сдвиг между напряжениями.

Измерения на основе схемы в виде делителя напряжения требуют на одно состояние схемы больше, чем соответствующие структуры на основе моста. В связи с этим средства измерений СКС на основе мостовой измерительной схемы являются более быстродействующими по сравнению со средствами измерений на основе делителя напряжения. Минимальное время измерения достигается одновременным измерением обоих параметров выходного сигнала мостовой измерительной схемы с одним состоянием (11).

При высоковольтных измерениях СКС объекта измерения на основе мостовой схемы максимальное напряжение на объекте измерения ограничивается предельно допустимым напряжением на опорном элементе, противолежащем объекту. При использовании измерительной схемы в виде делителя напряжения напряжение на объекте может превышать предельно допустимые напряжения на опорных элементах.

Таблица 3.1 – Структуры устройств на основе мостовой измерительной схемы

№	Код	Структурная схема	Система уравнений измерения
1	111		$\begin{cases} \dot{W} = \frac{(R_2^2 + X_2^2) \cdot [(R_0 + R_X)^2 + (X_0 + X_X)^2]}{(X_0^2 + R_0^2) \cdot [(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2]} \\ \phi = \arctg \left(\frac{A_1 + B_1 \cdot R_X + C_1 \cdot X_X}{A_2 + B_2 \cdot R_X + C_2 \cdot X_X} \right) \\ U_X = U_2 \left(1 + \frac{Z_1}{Z_2} \right) - U_0 \end{cases}$
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		$\begin{cases} \phi_1 = \arctg \frac{A_1 + B_1 R_X + C_1 X_X}{A_2 + B_2 R_X + C_2 X_X}, \\ \phi_2 = \arctg \frac{A_3 + B_3 R_X + C_3 X_X}{A_4 + B_4 R_X + C_4 X_X}, \\ U_X = U_2 \left(1 + \frac{Z_{01}}{Z_2} \right) - U_{01} \end{cases}$

Таблица 3.2 – Структуры устройств на основе делителя напряжения

№	Код	Структурная схема	Система уравнений измерения
1	011		$\begin{cases} \frac{U_{01}^2}{U_{02}^2} = \frac{Z_{01}^2 \left[(R_X + R_{02})^2 + (X_X + X_{02})^2 \right]}{Z_{02}^2 \left[(R_X + R_{01})^2 + (X_X + X_{01})^2 \right]}, \\ \phi_1 - \phi_2 = \arctg \left(\frac{X_{01}R_X - R_{01}X_X}{Z_{01}^2 + R_X R_{01} + X_X X_{01}} \right) - \\ - \arctg \left(\frac{X_{02}R_X - R_{02}X_X}{Z_{02}^2 + R_X R_{02} + X_X X_{02}} \right). \end{cases}$
2	0001		$\begin{cases} \frac{U_{01}^2}{U_{02}^2} = \frac{Z_{01}^2 \left[(R_X + R_{02})^2 + (X_X + X_{02})^2 \right]}{Z_{02}^2 \left[(R_X + R_{01})^2 + (X_X + X_{01})^2 \right]}, \\ \frac{U_{01}^2}{U_{03}^2} = \frac{Z_{01}^2 \left[(R_X + R_{03})^2 + (X_X + X_{03})^2 \right]}{Z_{03}^2 \left[(R_X + R_{01})^2 + (X_X + X_{01})^2 \right]} \end{cases}$
3	0011		$\begin{cases} \phi_1 - \phi_2 = \arctg \frac{X_{01}R_X - R_{01}X_X}{R_{01}(R_{01} + R_X) + X_{01}(X_{01} + X_X)} - \\ - \arctg \frac{X_{02}R_X - R_{02}X_X}{R_{02} \cdot (R_{02} + R_X) + X_{02} \cdot (X_{02} + X_X)}, \\ \phi_1 - \phi_3 = \arctg \frac{X_{01}R_X - R_{01}X_X}{R_{01} \cdot (R_{01} + R_X) + X_{01} \cdot (X_{01} + X_X)} - \\ - \arctg \frac{X_{03}R_X - R_{03}X_X}{R_{03} \cdot (R_{03} + R_X) + X_{03} \cdot (X_{03} + X_X)}. \end{cases}$

Базовые структурные схемы средства измерений СКС R_X и X_X комплексного сопротивления $\dot{Z}_X$ состоят из следующих компонентов: опорные

элементы $\dot{Z}_{0n}$ измерительного делителя напряжения, опорные элементы $\dot{Z}_1$ и $\dot{Z}_2$ опорного делителя мостовой измерительной схемы, АЦП синусоидального напряжения АЦПН, АЦП фазового сдвига напряжений АЦПФ, блок вычислений БВ, блок управления и вычислений БУВ, коммутационные элементы. В схемах на основе делителя напряжения с прямым измерением фазового сдвига (01), (001) введен трансформатор напряжения питания измерительной схемы для формирования на входе АЦПФ синусоидального напряжения с начальной фазой.

При питании источника питания измерительной схемы от источника синусоидального напряжения с ненормированной частотой возникает задача измерения частоты синусоидального напряжения [4]. Для решения этой измерительной задачи в структуру вводится цифровой частотомер. На рисунке 3-2 представлены структуры устройства для измерения СКС и напряжения на объекте измерения на основе мостовой измерительной схемы (рисунок 3.2,а) и на основе измерительной схемы в виде делителя напряжения (рисунок 3.2,б), где Ч – цифровой частотомер.

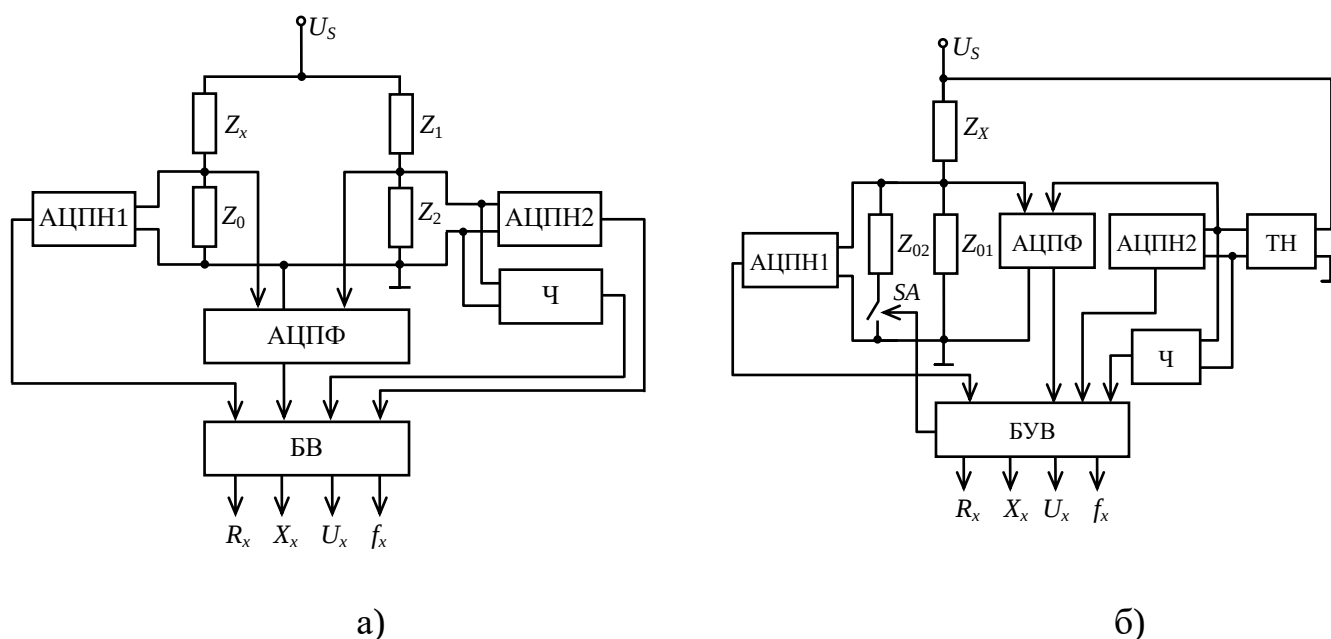


Рисунок 3.2 – Структуры устройства для измерения СКС и напряжения на объекте измерения при ненормированных метрологических характеристиках источника питания:

а – на основе мостовой измерительной схемы;
б – на основе делителя напряжения

Аналогичным образом цифровой частотомер вводится в другие базовые структуры устройства для измерения СКС и напряжения на объекте измерения (см. таблицы 3.1, 3.2).

Базовые структуры устройства для измерения СКС и напряжения на объекте измерения, разработанные в ходе исследований, позволяют реализовать все выделенные в результате систематизации варианты процесса измерения СКС и напряжения на объекте, включая рабочие режимы с питанием измерительной схемы от источника синусоидального напряжения с ненормированными метрологическими характеристиками.

3.3 РАЗРАБОТКА БАЗОВЫХ СТРУКТУР УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ СОСТАВЛЯЮЩИХ КОМПЛЕКСНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ И НАПРЯЖЕНИЯ НА ОБЪЕКТЕ НА ОСНОВЕ МОСТОВОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СХЕМЫ

При питании мостовой измерительной схемы синусоидальным напряжением в средних точках измерительного и опорного делителей формируются, соответственно, напряжения

$$\dot{U}_0 = \frac{U_S \dot{Z}_0}{\dot{Z}_0 + \dot{Z}_X} \text{ и } \dot{U}_2 = \dot{U}_S \cdot \frac{\dot{Z}_2}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2}, \quad (3.1)$$

Если выбрать в качестве функции $\dot{W}$ отношение $\frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_0}$, то обобщенное уравнение примет в данном случае вид

$$\dot{W} = \frac{\dot{Z}_2(\dot{Z}_0 + \dot{Z}_X)}{(\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2)}. \quad (3.2)$$

Структура устройства для измерений СКС и напряжения на объекте измерения на основе мостовой измерительной схемы с измерением двух величин (001, табл. 1) включает в себя источник синусоидального напряжения

$\dot{U}_S$, три опорных ДЭЦ с комплексными сопротивлениями $\dot{Z}_0$, $\dot{Z}_1$ и $\dot{Z}_2$, два АЦП напряжения АЦП1 и АЦП2, АЦП фазового сдвига АЦПФ, блок вычисления БВ. В каждом цикле измерения осуществляются аналого-цифровых преобразования амплитуды напряжений $\dot{U}_0$ и $\dot{U}_2$ в средних точках измерительного и опорного делителей, соответственно, на опорных ДЭЦ с комплексными сопротивлениями $\dot{Z}_0$ и $\dot{Z}_2$, а также фазового сдвига ϕ между этими напряжениями. По результатам аналого-цифровых преобразований БВ вычисляет значения СКС объекта измерения как решений системы уравнений

$$\begin{cases} |W| = \frac{(R_2^2 + X_2^2) \cdot [(R_0 + R_X)^2 + (X_0 + X_X)^2]}{(X_0^2 + R_0^2) \cdot [(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2]}, \\ \phi = \arctg \left(\frac{A_1 + B_1 \cdot R_X + C_1 \cdot X_X}{A_2 + B_2 \cdot R_X + C_2 \cdot X_X} \right), \end{cases} \quad (3.3)$$

где

$$\begin{aligned} A_1 &= (X_0^2 + R_0^2) \cdot (R_1 \cdot X_2 - X_1 \cdot R_2), \\ B_1 &= -X_0 \cdot (R_2^2 + X_2^2) + R_0 \cdot (X_1 R_2 - R_1 X_2) + X_0 \cdot (R_1 R_2 + X_1 X_2), \\ C_1 &= R_0 \cdot (R_2^2 + X_2^2) + R_0 \cdot (R_1 R_2 - R_1 X_2) + X_0 \cdot (R_1 X_2 + X_1 R_2), \\ A_2 &= (X_0^2 + R_0^2) \cdot [(R_1 + R_2) \cdot R_2 + (X_1 + X_2) \cdot X_2], \\ B_2 &= R_0 \cdot (R_2^2 + X_2^2) + R_0 \cdot (R_0 R_2 - X_1 X_2) + X_0 \cdot (X_2 R_1 + X_1 R_2), \\ C_2 &= X_0 \cdot (R_2^2 + X_2^2) + R_0 \cdot (X_1 R_2 - R_1 X_2) + X_0 \cdot (R_1 R_2 + X_1 X_2). \end{aligned}$$

Система уравнений (3.3) имеет следующие решения:

$$\begin{cases} X = \frac{X_0 - (R_0 + K_1) \cdot K_2}{K_2^2 + 1} + \\ + \sqrt{\frac{(R_0^2 + X_0^2)((R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2) \cdot |W| - (R_0 + K_1 - K_2 X_0)^2 (R_2^2 + X_2^2)}{(R_2^2 + X_2^2)(K_2^2 + 1)^2}}, \\ R_X = K_1 + K_2 \cdot X_X, \end{cases} \quad (3.4)$$

где $K_1 = \frac{A_1 - \operatorname{tg} \phi \cdot A_2}{\operatorname{tg} \phi \cdot B_2 - B_1}$, $K_2 = \frac{C_1 - \operatorname{tg} \phi \cdot C_2}{\operatorname{tg} \phi \cdot B_2 - B_1}$.

Графическое решение системы уравнений (3.3) представлено на рисунке 3.3.

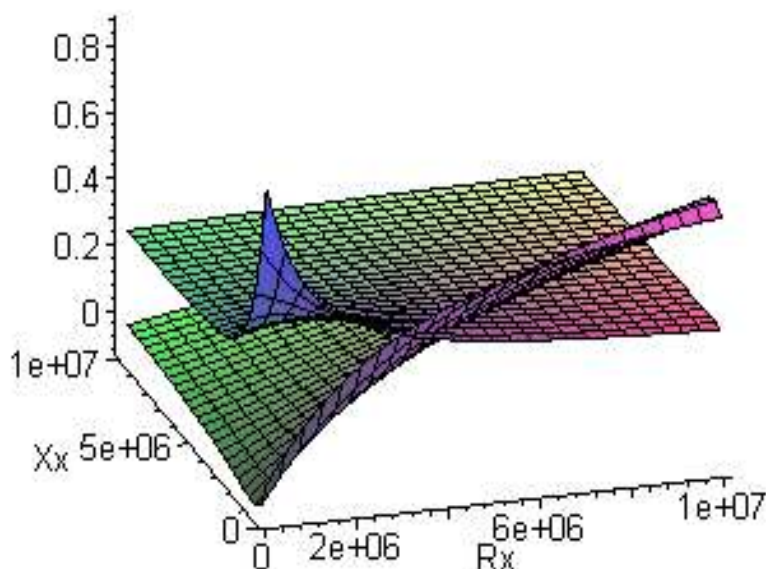


Рисунок 3.3 – Графическое решение системы уравнений (3.3)

Реализацию данного варианта структуры устройства для измерения СКС и напряжения на объекте измерения следует проводить с учетом следующих рекомендаций:

1. Модули комплексного сопротивления опорной ДЭЦ и ДЭЦ в нижнем плече опорного делителя должны быть равны, чтобы минимизировать амплитудную погрешность измерения фазового сдвига.

2. Модуль z_0 комплексного сопротивления $\dot{Z}_0$ опорной ДЭЦ измерительного делителя должен удовлетворять условию $z_0 < \frac{U_{0\max} z_{X\min}}{U_X}$, где $U_{0\max}$ – предельно допустимое напряжение на опорной ДЭЦ, $z_{X\min}$ – минимальное значение модуля комплексного сопротивления $\dot{Z}_0$.

3 Модули комплексных сопротивлений ДЭЦ опорного делителя должны выбираться такими, чтобы максимальное напряжение на них не превышало предельного рабочего напряжения.

Достаточность одного состояния измерительной схемы для измерения СКС, возможность измерения амплитуды напряжения питания измерительной схемы по значению амплитуды напряжения в средней точке опорного делителя, возможность измерения фазового сдвига без формирования сигнала опорной фазы, возможность одновременного измерения амплитуд напряжений в средних точках обоих делителей и фазового сдвига между ними обеспечивает данному варианту устройства наибольшее быстроедействие по сравнению с другими вариантами структуры устройства для измерений СКС и напряжения на объекте измерений.

Структура устройства для измерений СКС и напряжения на объекте измерения на основе мостовой измерительной схемы с совокупными измерениями амплитуды напряжения (1001, табл. 1) включает в себя источник синусоидального напряжения $\dot{U}_S$, 4 опорных ДЭЦ с комплексными сопротивлениями $\dot{Z}_{01}$, $\dot{Z}_{02}$, $\dot{Z}_1$ и $\dot{Z}_2$, два АЦП напряжения АЦП1 и АЦП2, аналоговый электронный ключ SA, блок управления и вычисления БУВ. Измерения амплитуды напряжений на опорных элементах осуществляется в два такта при различных положениях электронного ключа SA.

Формирование напряжений на опорной ДЭЦ измерительного делителя $\dot{U}_{01}$ и $\dot{U}_{02}$ в первом и втором тактах преобразования описываются следующими уравнениями:

$$U_{01} = U_S \cdot \frac{Z_{01}}{Z_{01} + Z_X}, \quad U_{02} = U_S \cdot \frac{Z_{02}}{Z_{02} + Z_X}. \quad (3.5)$$

По результатам аналого-цифровых преобразований БУВ вычисляет значения СКС объекта измерения как решений системы уравнений

$$\begin{cases} |\dot{W}_1|^2 = \frac{(R_2^2 + X_2^2) \cdot [(R_{01} + R_X)^2 + (X_{01} + X_X)^2]}{(X_{01}^2 + R_{01}^2) [(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2]}, \\ |\dot{W}_2|^2 = \frac{(R_2^2 + X_2^2) \cdot [(R_{02} + R_X)^2 + (X_{02} + X_X)^2]}{(X_{02}^2 + R_{02}^2) \cdot [(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2]}. \end{cases} \quad (3.6)$$

Здесь $|\dot{W}_1| = \frac{U_2}{U_{01}}$, $|\dot{W}_2| = \frac{U_2}{U_{02}}$.

Данная система уравнений имеет следующие решения:

$$\begin{cases} X_X = -\frac{4 \cdot (R_{01} - R_{02})^2 X_{01} + (X_{01} - X_{02})(2R_{01}(R_{01} - R_{02}) + Z_{01}^2 - Z_{02}^2 + K_2 - K_1)}{4 \cdot (R_{01} - R_{02}) \cdot (R_{01} - R_{02} + X_{01} - X_{02})} + \\ \sqrt{\frac{[4 \cdot (R_{01} - R_{02})^2 X_{01} + (X_{01} - X_{02})(2R_{01}(R_{01} - R_{02}) + Z_{01}^2 - Z_{02}^2 + K_2 - K_1)]^2}{16 \cdot (R_{01} - R_{02})^2 \cdot (R_{01} - R_{02} + X_{01} - X_{02})^2} -} \\ - \frac{4 \cdot X_{01}^2 \cdot (R_{01} - R_{02})^2 + [2(R_{01} - R_{02}) \cdot R_{01} + Z_{01}^2 - Z_{02}^2 + K_2 - K_1]^2}{4 \cdot (R_{01} - R_{02} + X_{01} - X_{02}) \cdot (R_{01} - R_{02})} \\ R_X = K_1 + K_2 \cdot X_X \end{cases}, \quad (3.7)$$

где

$$Z_{01}^2 = R_{01}^2 + X_{01}^2, Z_{02}^2 = R_{02}^2 + X_{02}^2, K_1 = \frac{|\dot{W}_1|^2 \cdot Z_{01}^2 \cdot [(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2]}{R_2^2 + X_2^2},$$

$$K_2 = \frac{|\dot{W}_2|^2 \cdot Z_{02}^2 \cdot [(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2]}{R_2^2 + X_2^2}.$$

Графическое решение системы уравнений (3.1) представлено на рисунке 3.4.

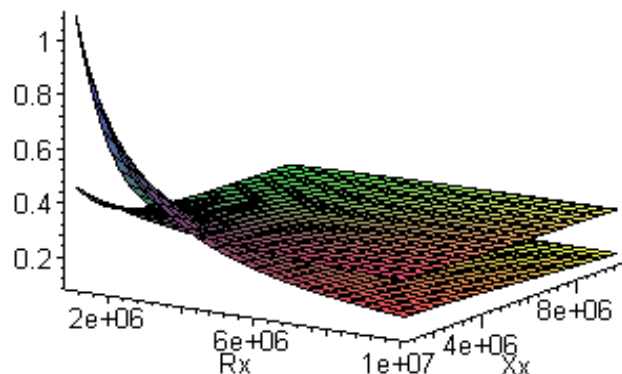


Рисунок 3.4 – Графическое решение системы уравнений (3.6)

Рекомендации по выбору параметров опорных ДЭЦ при проектировании устройства для измерения СКС и напряжения на объекте измерения на основе мостовой измерительной схемы путём совокупных измерений амплитуды напряжения:

1 Модуль z_{01} комплексного сопротивления $\dot{Z}_{01}$ опорной ДЭЦ должен иметь максимально возможное значение, которое ограничивается пределом допустимой амплитуды напряжения на опорной ДЭЦ, и удовлетворять условию $z_{01} \geq 0.1 z_{X \max}$.

2 Отношение модуля z_{01} комплексного сопротивления $\dot{Z}_{01}$ опорной ДЭЦ в течение первого такта аналого-цифрового преобразования к модулю z_{02} комплексного сопротивления $\dot{Z}_{02}$ опорной ДЭЦ в течение второго такта аналого-цифрового преобразования должно иметь минимально возможное значение, которое ограничивается нижним пределом диапазона преобразования амплитуды синусоидального напряжения АЦП.

Структура устройства для измерений СКС и напряжения на объекте измерения на основе мостовой измерительной схемы с совокупными измерениями фазового сдвига напряжения (вариант базовой структуры 1011 в табл. 3.1) включает в себя источник синусоидального напряжения $\dot{U}_S$, 4 опорных ДЭЦ с комплексными сопротивлениями $\dot{Z}_{01}$, $\dot{Z}_{02}$, $\dot{Z}_1$ и $\dot{Z}_2$, АЦП

фазового сдвига напряжений АЦПФ, АЦП напряжения АЦПН, аналоговый электронный ключ SA, блок управления и вычисления БУВ. Измерения фазовых сдвигов ϕ_1 и ϕ_2 напряжений на опорных элементах осуществляются при различных положениях электронного ключа SA.

Способ измерений СКС Z_X с измерением фазового сдвига состоит в измерениях фазовых сдвигов ϕ_1 и ϕ_2 между напряжениями на нижних плечах делителей напряжения ИС при значениях сопротивления опорной ДЭЦ измерительного делителя $\dot{Z}_{01}$ и $\dot{Z}_{02}$ соответственно. Значения СКС измеряемой ДЭЦ находятся как решения системы двух уравнений

По результатам аналого-цифровых преобразований фазовых сдвигов ϕ_1 и ϕ_2 блок управления и вычислений БУВ вычисляет значения СКС объекта измерения как решений системы уравнений:

$$\begin{cases} \phi_1 = \arctg \frac{A_1 + B_1 \cdot R_X + C_1 \cdot X_X}{A_2 + B_2 \cdot R_X + C_2 \cdot X_X}, \\ \phi_2 = \arctg \frac{A_3 + B_3 \cdot R_X + C_3 \cdot X_X}{A_4 + B_4 \cdot R_X + C_4 \cdot X_X}, \end{cases} \quad (3.8)$$

где

$$\begin{aligned} A_1 &= (X_{01}^2 + R_{01}^2) \cdot (R_1 \cdot X_2 - X_1 \cdot R_2), \\ B_1 &= -X_{01} \cdot (R_2^2 + X_2^2) + R_{01} \cdot (X_1 \cdot R_2 - R_1 \cdot X_2) + X_{01} \cdot (R_1 \cdot R_2 + X_1 \cdot X_2) \\ C_1 &= R_{01} \cdot (R_2^2 + X_2^2) + R_{01} \cdot (R_1 \cdot R_2 - R_1 \cdot X_2) + X_{01} \cdot (R_1 \cdot X_2 + X_1 \cdot R_2) \\ A_2 &= (X_{01}^2 + R_{01}^2) \cdot [(R_1 + R_2) \cdot R_2 + (X_1 + X_2) \cdot X_2] \\ B_2 &= R_{01} \cdot (R_2^2 + X_2^2) + R_{01} \cdot (R_0 \cdot R_2 - X_1 \cdot X_2) + X_{01} \cdot (X_2 \cdot R_1 + X_1 \cdot R_2), \\ C_2 &= X_{01} \cdot (R_2^2 + X_2^2) + R_{01} \cdot (X_1 R_2 - R_1 X_2) + X_{01} \cdot (R_1 R_2 + X_1 X_2), \\ A_3 &= (X_{02}^2 + R_{02}^2) \cdot (R_1 \cdot X_2 - X_1 \cdot R_2), \\ B_3 &= -X_{02} \cdot (R_2^2 + X_2^2) + R_{02} \cdot (X_1 \cdot R_2 - R_1 \cdot X_2) + \\ &+ X_{02} \cdot (R_1 \cdot R_2 + X_1 \cdot X_2) \\ C_3 &= R_{02} \cdot (R_2^2 + X_2^2) + R_{02} \cdot (R_1 \cdot R_2 - R_1 \cdot X_2) + X_{02} \cdot (R_1 \cdot X_2 + X_1 \cdot R_2) \\ A_4 &= (X_{02}^2 + R_{02}^2) \cdot [(R_1 + R_2) \cdot R_2 + (X_1 + X_2) \cdot X_2], \end{aligned}$$

$$B_4 = R_{02} \cdot (R_2^2 + X_2^2) + R_{02} \cdot (R_0 \cdot R_2 - X_1 \cdot X_2) + X_{02} \cdot (X_2 \cdot R_1 + X_1 \cdot R_2),$$

$$C_4 = X_{02} \cdot (R_2^2 + X_2^2) + R_{02} \cdot (X_1 \cdot R_2 - R_1 \cdot X_2) + X_{02} \cdot (R_1 \cdot R_2 + X_1 \cdot X_2),$$

Данная система уравнений имеет следующие решения:

$$\begin{cases} X_X = \frac{D_1 D_2 (A_2 B_4 - A_4 B_2) + D_1 (A_3 B_2 - A_2 B_3) + D_2 (A_4 B_1 - A_1 B_4) + A_1 B_3 - A_3 B_1}{D_1 D_2 (B_2 C_4 - B_4 C_2) + D_1 (B_3 C_2 - B_2 C_3) + D_2 (B_4 C_1 - B_1 C_4) + B_1 C_3 - B_3 C_1}, \\ R_X = \frac{A_3 - A_4 D_2 + X_X \cdot (C_3 - C_4 D_2)}{B_4 D_2 - B_3}. \end{cases} \quad (3.9)$$

где $D_1 = \operatorname{tg}(\phi_1)$, $D_2 = \operatorname{tg}(\phi_2)$.

Графическое решение системы уравнений представлено на рисунке 3.5.

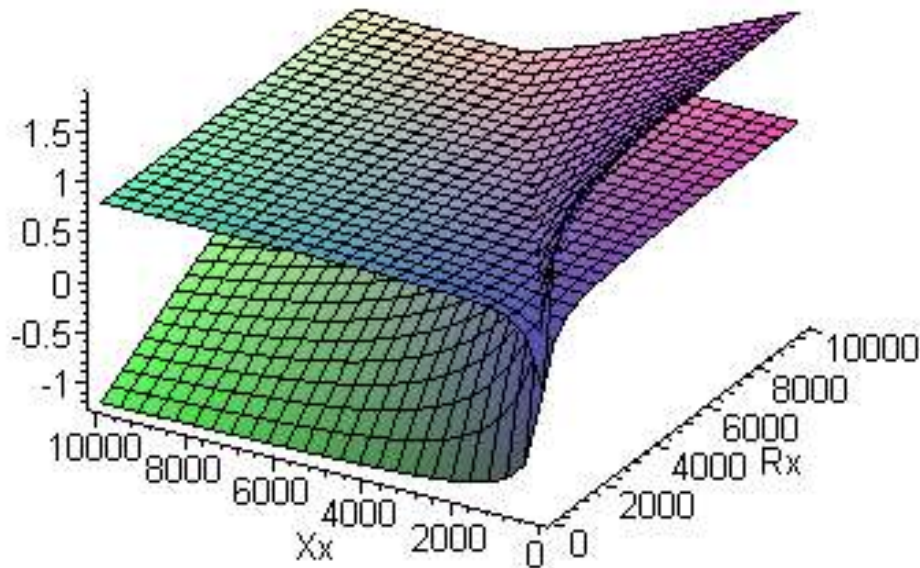


Рисунок 3.5 – Графическое решение системы уравнений (3.8) при измерении фазовых сдвигов

Рекомендации по выбору параметров опорных ДЭЦ при проектировании устройства для измерения СКС и напряжения на объекте измерения на основе мостовой измерительной схемы путём совокупных измерений амплитуды напряжения на опорных ДЭЦ:

1 Модуль z_0 комплексного сопротивления $\dot{Z}_0$ каждой опорной ДЭЦ должен удовлетворять условию $z_0 < \frac{U_{0\max} z_X}{U_X}$, где $U_{0\max}$ – предельно допустимая амплитуда напряжения на опорной ДЭЦ.

2 Отношение R_{01} / X_{01} должно иметь минимально возможное значение, а отношение R_{03} / X_{03} – максимально возможное значение. Значение отношения R_{02} / X_{02} рассчитывается как среднее арифметическое отношений R_{01} / X_{01} и R_{03} / X_{03} .

3.4 БАЗОВЫЕ СТРУКТУРЫ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ СОСТАВЛЯЮЩИХ КОМПЛЕКСНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ И НАПРЯЖЕНИЯ НА ОБЪЕКТЕ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СХЕМЫ В ВИДЕ ДЕЛИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Измерительная схема на основе делителя напряжения может рассматриваться как схема неуравновешенного моста, из которой исключен опорный делитель напряжения. Задача измерения СКС при этом существенно осложняется. Отсутствие опорного делителя делает невозможным как измерение напряжения на нижнем плече опорного делителя, так и измерение фазового сдвига напряжений, так как нет второй точки подключения АЦП фазового сдвига к измерительной схеме. Это определило постановку задачи разработки структур устройства для измерений СКС и напряжения на объекте на основе измерительной схемы в виде делителя напряжения, позволяющих преодолеть эти осложнения.

При питании измерительной схемы в виде делителя напряжения синусоидальным напряжением на опорной ДЭЦ формируются напряжение

$$\dot{U}_{01} = \frac{\dot{U}_S Z_{01}}{Z_{01} + Z_X}, \quad (3.10)$$

где $\dot{U}_{01} = U_{0m} \cdot e^{j(\omega t + \phi_1)}$, $\dot{U}_S = U_{sm} \cdot e^{j\omega t}$.

Данное уравнение как уравнение преобразования содержит от двух (составляющие R_X и X_X комплексного сопротивления $\dot{Z}_X$ объекта измерения) до шести неизвестных. Дополнительными неизвестными величинами могут являться амплитуды напряжений $\dot{U}_0$ и $\dot{U}_S$, их частота и фазовый сдвиг между ними. При измерении СКС значения этих величин должны быть известны априорно или получены путем измерений. При этом для измерений СКС требуется, по крайней мере, еще одно независимое уравнение. Оно может быть получено за счет организации второго состояния ИС введением в нее вместо опорной ДЭЦ с сопротивлением $\dot{Z}_{01}$ опорной ДЭЦ с сопротивлением $\dot{Z}_{02}$.

Второе состояние измерительной схемы описывается уравнением

$$U_{02} = \frac{\dot{U}_S Z_{02}}{Z_{02} + Z_X}, \quad (3.11)$$

где $\dot{U}_{02} = U_{0m2} \cdot e^{j \cdot (\omega \cdot t + \phi_2)}$.

Проблема отсутствия второй точки подключения АЦП фазы решена путем формирования сигнала опорной фазы с частотой напряжения питания измерительной схемы. Этот сигнал необходимо непрерывно формировать, по крайней мере, в течение цикла измерения. За счёт этого в процессе измерения СКС осуществляется измерение фазового сдвига напряжения в средней точке измерительного делителя относительно напряжения с опорной фазой.

Структура устройства для измерений СКС и напряжения на объекте измерения на основе измерительной схемы в виде делителя напряжения с измерением двух величин (вариант базовой структуры 001 в табл. 3.2) включает в себя источник синусоидального напряжения $\dot{U}_S$, две опорных ДЭЦ с комплексными сопротивлениями $\dot{Z}_{01}$ и $\dot{Z}_{02}$, два АЦП напряжения АЦП1 и АЦП2, АЦП фазового сдвига АЦПФ, трансформатор напряжения ТН с коэффициентом трансформации K_{TH} и блок управления и вычисления БУВ. Трансформатор напряжения ТН преобразует напряжение питания $\dot{U}_S$ в

напряжение $\dot{U}_{TH}$ с опорной фазой, амплитудное значение которого входит в диапазон амплитуды входного напряжения всех АЦП устройства. В структуру также входит аналоговый ключ SA, осуществляющий периодическое подключение опорной ДЭЦ с сопротивлением $\dot{Z}_{02}$ к измерительной схеме по сигналам управления с БУВ.

Аналого-цифровое преобразование выходных сигналов измерительной схемы осуществляется дважды за цикл измерения при двух состояниях измерительной схемы. В течение первого такта преобразования ключ SA разомкнут, и ДЭЦ с комплексным сопротивлением $\dot{Z}_{01}$ является опорным плечом измерительной схемы. В течение второго такта преобразования ключ SA замкнут, и опорное плечо измерительной схемы представляет собой параллельное соединение ДЭЦ с комплексными сопротивлениями $\dot{Z}_{01}$ и $\dot{Z}_{02}$. В каждом такте преобразования осуществляется аналого-цифровое преобразование напряжения на опорном плече и фазового сдвига между напряжением в средней точке измерительной схемы и напряжением на выходе трансформатора ТН. По результатам аналого-цифровых преобразований БУВ вычисляет значения СКС объекта измерения как решений системы уравнений

$$\begin{cases} \frac{Um_{01}^2}{Um_{02}^2} = \frac{Z_{01}^2 \cdot \left[(R_X + R_{02})^2 + (X_X + X_{02})^2 \right]}{Z_{02}^2 \cdot \left[(R_X + R_{01})^2 + (X_X + X_{01})^2 \right]}, \\ \phi_1 - \phi_2 = \arctg \left(\frac{X_{01} \cdot R_X - R_{01} \cdot X_X}{Z_{01}^2 + R_X \cdot R_{01} + X_X \cdot X_{01}} \right) - \\ - \arctg \left(\frac{X_{02} \cdot R_X - R_{02} \cdot X_X}{Z_{02}^2 + R_X \cdot R_{02} + X_X \cdot X_{02}} \right). \end{cases} \quad (3.12)$$

Данная система уравнений имеет следующие решения:

$$\begin{cases} X_X = (0.25 \cdot p^2 - q)^{0.5} - 0.5 \cdot p, \\ R_X = k \cdot X_X + m, \end{cases} \quad (3.13)$$

$$\text{где } p = \frac{2 \cdot k \cdot m + b_1 + k \cdot c_1}{1 + k^2}, \quad q = \frac{a_1 + m^2 + c_1 \cdot m}{1 + k^2}, \quad k = \frac{b_1 \cdot a_2 - b_2}{c_2 - c_1 \cdot a_2}, \quad m = \frac{a_1 \cdot a_2 - d_2}{c_2 - c_1 \cdot a_2},$$

$$a_1 = \frac{\operatorname{tg} \phi \cdot Z_{01}^2 \cdot Z_{02}^2}{\operatorname{tg} \phi \cdot (R_{01} \cdot R_{02} + X_{01} \cdot X_{02}) + R_{01} \cdot X_{02} - R_{02} \cdot X_{01}},$$

$$b_1 = \frac{\operatorname{tg} \phi \cdot (Z_{01}^2 \cdot R_{02} + R_{01} \cdot Z_{02}^2) - Z_{02}^2 \cdot X_{01} + Z_{01}^2 \cdot X_{02}}{\operatorname{tg} \phi \cdot (R_{01} \cdot R_{02} + X_{01} \cdot X_{02}) + R_{01} \cdot X_{02} - R_{02} \cdot X_{01}},$$

$$c_1 = \frac{\operatorname{tg} \phi \cdot (Z_{01}^2 \cdot X_{02} + Z_{02}^2 \cdot X_{01}) - Z_{02}^2 \cdot R_{01} + Z_{01}^2 \cdot R_{02}}{\operatorname{tg} \phi \cdot (R_{01} \cdot R_{02} + X_{01} \cdot X_{02}) + R_{01} \cdot X_{02} - R_{02} \cdot X_{01}},$$

$$a_2 = \frac{U_{01}^2}{U_{02}^2} \cdot \frac{Z_{02}^2}{Z_{01}^2} - 1, \quad b_2 = 2 \cdot ((a_2 + 1) \cdot R_{01} - R_{02}),$$

$$c_2 = 2((a_2 + 1) \cdot X_{01} - X_{02}), \quad d_2 = (a_2 + 1) \cdot Z_{01}^2 - Z_{02}^2.$$

Значение амплитуды U_{Xm} напряжения $\dot{U}_X$ на объекте измерения вычисляется БУВ по результатам измерений амплитуды напряжения $\dot{U}_{02}$ и выходного напряжения трансформатора путём решения уравнения

$$U_{Xm} = \frac{U_{THm}}{K_{TH}} - U_{02m}, \quad (3.14)$$

где U_{THm} - амплитуда выходного напряжения $\dot{U}_{TH}$, U_{02m} - амплитуда напряжения $\dot{U}_{02}$.

Графическое решение данной системы уравнений по внешнему виду совпадает с графическим решением системы уравнений (3.3), представленном на рисунке 3.3.

Рекомендации по выбору параметров опорных ДЭЦ при проектировании устройства для измерения СКС и напряжения на объекте измерения на основе мостовой измерительной схемы путём совокупных измерений амплитуды напряжения:

1 Модуль z_{01} комплексного сопротивления $\dot{Z}_0$ опорной ДЭЦ с более высоким сопротивлением (примем $Z_{01} > Z_{02}$) должен иметь максимально возможное значение и удовлетворять условию $z_{01} \geq 0.1z_X$.

2 Модуль z_{01} комплексного сопротивления $\dot{Z}_0$ опорной ДЭЦ должен удовлетворять условию

$$z_0 < \frac{U_{0\max} z_X}{U_X}, \quad (3.15)$$

где $U_{0\max}$ – предельно допустимая амплитуда напряжения на опорной ДЭЦ.

3 Отношение R_{01} / X_{01} должно иметь минимально возможное значение, а отношение R_{02} / X_{02} – максимально возможное значение.

Структура устройства для измерений СКС и напряжения на объекте измерения на основе измерительной схемы в виде делителя напряжения с измерением напряжения (вариант базовой структуры 0001 в табл. 3.2) включает в себя источник синусоидального напряжения $\dot{U}_S$, три опорных ДЭЦ с комплексными сопротивлениями $\dot{Z}_{01}$, $\dot{Z}_{02}$ и $\dot{Z}_{03}$, два АЦП напряжения АЦП1 и АЦП2, АЦП фазового сдвига АЦПФ, трансформатор напряжения ТН с коэффициентом трансформации $K_{ТН}$ и блок управления и вычисления БУВ. Трансформатор напряжения ТН преобразует напряжение питания $\dot{U}_S$ в напряжение $\dot{U}_{ТН}$, амплитудное значение которого входит в диапазон амплитуды входного напряжения всех АЦП устройства. В структуру также входит аналоговые ключи SA1 и SA2, осуществляющие подключение второй и третьей опорных ДЭЦ к измерительной схеме по сигналам управления с БУВ.

Аналого-цифровое преобразование выходных сигналов измерительной схемы осуществляется трижды за цикл измерения, соответственно, при трёх состояниях измерительной схемы. В течение первого такта преобразования ключ SA разомкнут, и ДЭЦ с комплексным сопротивлением $\dot{Z}_{01}$ является опорным плечом измерительной схемы. В течение второго такта преобразования ключ SA1 замкнут, и опорное плечо измерительной схемы

представляет собой параллельное соединение двух опорных ДЭЦ с комплексными сопротивлениями $\dot{Z}_{02}$. В течение третьего такта преобразования ключ $SA2$ замкнут, и опорное плечо измерительной схемы представляет собой параллельное соединение трёх опорных ДЭЦ с комплексными сопротивлениями $\dot{Z}_{03}$. В каждом такте преобразования осуществляется аналого-цифровое преобразование напряжения на опорном плече и выходного напряжения $\dot{U}_{TH}$ трансформатора ТН. По результатам аналого-цифровых преобразований БУВ вычисляет значения СКС объекта измерения как решений системы уравнений

$$\begin{cases} W_1^2 = \frac{U_{01}^2}{U_{02}^2} = \frac{Z_{01}^2 \cdot \left[(R_X + R_{02})^2 + (X_X + X_{02})^2 \right]}{Z_{02}^2 \cdot \left[(R_X + R_{01})^2 + (X_X + X_{01})^2 \right]}, \\ W_2^2 = \frac{U_{01}^2}{U_{03}^2} = \frac{Z_{01}^2 \cdot \left[(R_X + R_{03})^2 + (X_X + X_{03})^2 \right]}{Z_{03}^2 \cdot \left[(R_X + R_{01})^2 + (X_X + X_{01})^2 \right]}. \end{cases} \quad (3.16)$$

Данная система уравнений имеет следующие решения:

$$\begin{cases} X_X = (0.25p - q)^{0.5} - 0.5p, \\ R_X = k \cdot X_X + m, \end{cases} \quad (3.17)$$

где

$$p = \frac{2a_1 \cdot k \cdot m + b_1 + k \cdot c_1}{a_1(1 + k^2)}, \quad q = \frac{a_1 \cdot m^2 + c_1 \cdot m + d_1}{a_1 \cdot (1 + k^2)},$$

$$k = \frac{b_1 \cdot a_2 - a_1 \cdot b_2}{a_1 \cdot c_2 - c_1 \cdot a_2}, \quad m = \frac{d_1 \cdot a_2 - a_1 \cdot d_2}{a_1 \cdot c_2 - c_1 \cdot a_2}, \quad a_1 = \frac{U_{01}^2}{U_{02}^2} \cdot \frac{Z_{02}^2}{Z_{01}^2} - 1, \quad b_1 = 2((a_1 + 1)R_{01} - R_{02}),$$

$$c_1 = 2((a_1 + 1) \cdot X_{01} - X_{02}), \quad d_1 = (a_1 + 1) \cdot Z_{01}^2 - Z_{02}^2, \quad a_2 = \frac{U_{01}^2}{U_{03}^2} \cdot \frac{Z_{03}^2}{Z_{01}^2} - 1,$$

$$b_2 = 2((a_2 + 1) \cdot R_{01} - R_{03}), \quad c_2 = 2((a_2 + 1) \cdot X_{01} - X_{03}), \quad d_2 = (a_2 + 1) \cdot Z_{01}^2 - Z_{03}^2.$$

Графическое решение данной системы по виду графиков совпадает с графическим решением системы уравнений (3.6), представленном на рисунке 3.4.

Значение амплитуды U_{Xm} напряжения $\dot{U}_X$ на объекте измерения вычисляется БУВ по результатам измерений амплитуды напряжения $\dot{U}_{03}$ и выходного напряжения трансформатора путём решения уравнения

$$U_{Xm} = \frac{U_{THm}}{K_{TH}} - U_{03m}, \quad (3.18)$$

где U_{THm} – амплитуда выходного напряжения $\dot{U}_{TH}$, U_{03m} – амплитуда напряжения $\dot{U}_{02}$.

Рекомендации по выбору параметров опорных ДЭЦ при разработке устройства для измерения СКС и напряжения на объекте измерения на основе измерительной схемы в виде делителя напряжения путём совокупных измерений амплитуды напряжений на опорных ДЭЦ:

1 Модуль z_{01} комплексного сопротивления опорной ДЭЦ с более высоким сопротивлением, примем $z_{01} > z_{02} > z_{03}$, должен иметь максимально возможное значение, определяемое предельно допустимым напряжением на мере пассивной электрической величины, и удовлетворять условию $z_{01} \geq 0,1z_X$.

2 Модуль z_{01} комплексного сопротивления $\dot{Z}_0$ опорной ДЭЦ должен удовлетворять условию $z_0 < \frac{U_{0\max} z_X}{U_X}$, где $U_{0\max}$ – предельно допустимая амплитуда напряжения на опорной ДЭЦ.

3 Отношения z_{02} / z_{01} и z_{03} / z_{01} должны иметь максимально возможные значения. При этом значение z_{01} ограничивается минимально возможным сопротивлением элементов опорной ДЭЦ или минимальным напряжением, преобразуемым АЦП амплитуды напряжения, а максимальное значение z_{02}

ограничивается предельным допустимым напряжением на опорной ДЭЦ или максимальным напряжением, преобразуемым АЦП напряжения.

Структура устройства для измерений СКС и напряжения на объекте измерения на основе измерительной схемы в виде делителя напряжения с измерением фазового сдвига (вариант базовой структуры 0011 в табл. 3.2) включает в себя источник синусоидального напряжения $\dot{U}_S$, три опорных ДЭЦ, АЦП фазового сдвига АЦПФ, АЦП напряжения АЦПН, трансформатор напряжения ТН с коэффициентом трансформации $K_{ТН}$ и блок управления и вычисления БУВ. Трансформатор напряжения $ТН$ преобразует напряжение питания $\dot{U}_S$ в напряжение $\dot{U}_{ТН}$ с опорной фазой, амплитудное значение которого входит в диапазон входного напряжения обоих АЦП устройства. В структуру устройства также входят аналоговые ключи SA1 и SA2, осуществляющие подключение соответствующей опорной ДЭЦ к измерительной схеме в течение соответствующего такта преобразования по сигналам управления с БУВ.

Аналого-цифровое преобразование выходных сигналов измерительной схемы осуществляется трижды за цикл измерения при трёх состояниях измерительной схемы. В течение первого такта преобразования ключи SA1 и SA2 разомкнуты, и ДЭЦ с комплексным сопротивлением $\dot{Z}_{01}$ является опорным плечом измерительной схемы. В течение второго такта преобразования ключ SA1 замкнут, и опорное плечо измерительной схемы имеет комплексное сопротивление $\dot{Z}_{02}$. В течение третьего такта преобразования ключи SA1 и SA2 замкнуты, и опорное плечо измерительной схемы имеет комплексное сопротивление $\dot{Z}_{03}$. В каждом такте преобразования осуществляется аналого-цифровое преобразование напряжения на опорном плече и фазового сдвига между напряжением в средней точке измерительной схемы и напряжением на выходе трансформатора ТН. По результатам аналого-цифровых преобразований БУВ вычисляет значения СКС объекта измерения как решений системы уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_1 - \phi_2 = \operatorname{arctg} \frac{X_{01} \cdot R_X - R_{01} \cdot X_X}{R_{01}(R_{01} + R_X) + X_{01}(X_{01} + X_X)} - \\ - \operatorname{arctg} \frac{X_{02} \cdot R_X - R_{02} \cdot X_X}{R_{02} \cdot (R_{02} + R_X) + X_{02} \cdot (X_{02} + X_X)}, \\ \phi_1 - \phi_3 = \operatorname{arctg} \frac{X_{01} \cdot R_X - R_{01} \cdot X_X}{R_{01} \cdot (R_{01} + R_X) + X_{01} \cdot (X_{01} + X_X)} - \\ - \operatorname{arctg} \frac{X_{03} \cdot R_X - R_{03} \cdot X_X}{R_{03} \cdot (R_{03} + R_X) + X_{03} \cdot (X_{03} + X_X)}. \end{array} \right. \quad (3.19)$$

Данная система уравнений имеет следующие решения:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_X = -0.5p + \sqrt{0.25p^2 - q}, \\ X_X = \frac{(c_1a_2 - a_1c_2)R_X + (d_2c_1 - d_1c_2)}{c_2b_1 - b_2c_1}, \end{array} \right. \quad (3.20)$$

где

$$p = \frac{a_1(b_1c_2 - b_2c_1)^2 + b_1(c_1a_2 - a_1c_2)(b_1c_2 - b_2c_1) + 2c_1(c_1a_2 - c_2a_1)(c_1d_2 - c_2d_1)}{c_1((c_1a_2 - c_2a_1)^2 + (c_2b_1 - c_1b_2)^2)},$$

$$q = \frac{d_1(c_2b_1 - c_1b_2)^2 + b_1(c_2b_1 - c_1b_2)(c_1d_2 - d_1c_2) + c_1(c_1d_2 - d_1c_2)^2}{(c_2b_1 - c_1b_2)^2},$$

$$a_1 = \operatorname{tg}(\phi_1 - \phi_2) \cdot (Z_{01}^2 \cdot R_{02} + R_{01} \cdot Z_{02}^2) - X_{01} \cdot Z_{02}^2 + X_{02} \cdot Z_{01}^2,$$

$$b_1 = \operatorname{tg}(\phi_1 - \phi_2) (Z_{01}^2 \cdot X_{02} + X_{01} \cdot Z_{02}^2) + R_{01} \cdot Z_{02}^2 - R_{02} \cdot Z_{01}^2,$$

$$c_1 = \operatorname{tg}(\phi_1 - \phi_2) \cdot (R_{01} \cdot R_{02} + X_{01} \cdot X_{02}) + X_{01} \cdot R_{02} - R_{01} \cdot X_{02},$$

$$d_1 = \operatorname{tg}(\phi_1 - \phi_2) \cdot Z_{01}^2 \cdot Z_{02}^2,$$

$$a_2 = \operatorname{tg}(\phi_1 - \phi_3) \cdot (Z_{01}^2 \cdot R_{03} + R_{01} \cdot Z_{03}^2) - X_{01} \cdot Z_{03}^2 + X_{03} \cdot Z_{01}^2,$$

$$b_2 = \operatorname{tg}(\phi_1 - \phi_3) \cdot (Z_{01}^2 \cdot X_{03} + X_{01} \cdot Z_{03}^2) + R_{01} \cdot Z_{03}^2 - R_{03} \cdot Z_{01}^2,$$

$$c_2 = \operatorname{tg}(\phi_1 - \phi_3) \cdot (R_{01}R_{03} + X_{01}X_{03}) + X_{01}R_{03} - R_{01}X_{03},$$

$$d_2 = \operatorname{tg}(\phi_1 - \phi_3) \cdot Z_{01}^2 \cdot Z_{03}^2.$$

Графическое решение системы уравнений (3.20) по внешнему виду совпадает с графиками, представленными на рисунке 3.5.

Рекомендации по выбору параметров опорных ДЭЦ при проектировании устройства для измерения СКС и напряжения на объекте измерения на основе измерительной схемы в виде делителя напряжения путём совокупных измерений фазового сдвига напряжений:

- 1 Отношение R_{01} / X_{01} должно иметь минимально возможное значение, а отношение R_{03} / X_{03} – максимально возможное значение.
- 2 Значение отношения R_{02} / X_{02} рассчитывается как среднее арифметическое отношений R_{01} / X_{01} и R_{03} / X_{03} .

Таким образом, разработаны три структуры устройства для измерения СКС и напряжения на объекте измерений на основе измерительной схемы в виде делителя напряжения в соответствии вариантами, определенными в результате систематизации базовых структур: с совместными измерениями амплитуды напряжения на опорной ДЭЦ и фазовый сдвиг между напряжением на опорной ДЭЦ и напряжением с опорной фазой, с совокупными измерениями амплитуды напряжения на опорных ДЭЦ и с совокупными измерениями фазовых сдвигов между напряжениями на опорных ДЭЦ.

Сформулированы рекомендации по выбору параметров опорных ДЭЦ при разработке устройства для измерения СКС и напряжения на объекте измерения на основе измерительной схемы в виде делителя напряжения.

Структуры устройства для измерения СКС и объекта измерения на основе измерительной схемы в виде делителя напряжения целесообразно применять в рабочих режимах гетерогенных объектов с питанием измерительной схемы от высоковольтных источников синусоидального напряжения, в частности, промышленных электрических сетей высокого напряжения, так как эти структуры не содержат высоковольтных прецизионных элементов опорных ДЭЦ.

3.5 АНАЛИЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ УМЕНЬШЕНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ КОМПЛЕКСНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ ПОГРЕШНОСТЯМИ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ КОМПЛЕКСНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ОПОРНЫХ ДВУХПОЛЮСНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Оценим составляющие основной погрешности измерения СКС разработанными способами на основе измерительной схемы в виде делителя напряжения, обусловленные отклонением сопротивлений элементов опорных ДЭЦ от номинальных значений [6].

В настоящее время значения отклонения сопротивления резисторов с номинальным сопротивлением $10^3 - 10^{10}$ Ом находятся в диапазоне $(0.001 - 10) \%$, а отклонения емкости конденсаторов с номинальной емкостью $10^{-12} - 10^{-6}$ Ф – в диапазоне $\pm (0.01 - 20) \%$ на частоте 1 кГц.

Если опорная ДЭЦ представляет собой резистор, то модуль z_0 сопротивления $\dot{Z}_0$ не зависит от частоты в определенном частотном диапазоне, и его относительное отклонение от номинального значения равно отклонению сопротивления резистора $\delta z_0 = \delta R_0$.

Если опорная ДЭЦ имеет в своем составе конденсатор, то модуль её сопротивления является функцией частоты напряжения питания измерительной схемы, и отклонение частоты $\delta \omega$ от номинального значения вместе с отклонениями сопротивления резистора δR_0 и емкости конденсатора δC_0 определяют отклонение модуля сопротивления δZ_0 от номинального значения. При этом каждая составляющая сопротивления такой ДЭЦ зависит от сопротивления резистора, емкости конденсатора, частоты напряжения питания измерительной схемы и схемы соединений элементов.

При преобразовании СКС ДЭЦ с использованием одной, двух или трех опорных ДЭЦ в виде параллельного соединения резистора с сопротивлением R_n и конденсатора с ёмкостью C_n ($n = 1, 2, 3$ – номер опорной ДЭЦ), СКС опорной ДЭЦ определяются следующими выражениями:

$$R_{0n} = \frac{R_n}{1 + \omega^2 R_n^2 C_n^2}, \quad X_{0n} = \frac{\omega \cdot R_n^2 \cdot C_n}{1 + \omega^2 R_n^2 C_n^2}. \quad (3.21)$$

Погрешности формирования СКС опорной ДЭЦ определяются выражениями

$$\begin{aligned} \delta R_{0n} &= \sqrt{\delta_R^2(R_n) + \delta_R^2(C_n) + \delta_R^2(\omega)}, \\ \delta X_{0n} &= \sqrt{\delta_X^2(R_n) + \delta_X^2(C_n) + \delta_X^2(\omega)}, \end{aligned} \quad (3.22)$$

где $\delta_R(R_n)$ – составляющая погрешности формирования активной составляющей сопротивления опорной ДЭЦ, обусловленная отклонением сопротивления опорного резистора от номинального значения, $\delta_R(C_n)$ – составляющая погрешности формирования активной составляющей сопротивления опорной ДЭЦ, обусловленная отклонением емкости опорного конденсатора от номинального значения, $\delta_X(R_n)$ – составляющая погрешности формирования реактивной составляющей сопротивления опорной ДЭЦ, обусловленная отклонением сопротивления опорного резистора от номинального значения, $\delta_X(C_n)$ – составляющая погрешности формирования реактивной составляющей сопротивления опорной ДЭЦ, обусловленная отклонением емкости опорного конденсатора от номинального значения.

Составляющие погрешностей формирования номинальных значений СКС опорной ДЭЦ, обусловленных отклонением частоты $\delta\omega$ напряжения питания ИС от номинального значения ω , определяются выражениями

$$\delta_{R0}(\omega) = \frac{-2 R_n^2 C_n^2 \omega^2}{1 + R_n^2 C_n^2 \omega^2} \cdot \delta\omega \quad (3.23)$$

и

$$\delta_{X0}(\omega) = \frac{1 - R_n^2 C_n^2 \omega^2}{1 + R_n^2 C_n^2 \omega^2} \cdot \delta\omega. \quad (3.24)$$

В зависимости от значения произведения $R_n C_n \omega$ весовой коэффициент погрешности $\delta\omega$ при формировании погрешности $\delta_{R0}(\omega)$ изменяется от 0 ($\omega =$

0) до -2 ($R_n C_n \omega \gg 1$), при формировании $\delta_{X0}(\omega)$ – от 1 ($\omega=0$) до -1 ($R_n C_n \omega \gg 1$).

Таким образом, при заданных погрешностях измерений СКС и частоте гармонического напряжения питания измерительной схемы, составляющая погрешности формирования сопротивления опорной ДЭЦ, обусловленная отклонением частоты от номинального значения, может быть уменьшена путем выбора значения постоянной времени опорной ДЭЦ $R_n C_n$ с учетом выражений (3.23) и (3.24). Если требуемая точность измерения не достигается, то необходимо проводить совместные измерения СКС ДЭЦ и частоты напряжения питания измерительной схемы или организовать измерение частоты отдельно с целью минимизации погрешности $\delta\omega$, которая в рабочих режимах может е нормироваться.

Составляющие погрешности формирования активной составляющей сопротивления опорной ДЭЦ, обусловленные отклонением сопротивления опорного резистора и емкости опорного конденсатора от номинального значения определяются соответственно выражениями

$$\delta_{R0}(R_n) = \frac{R_n C_n \omega (1 - R_n^2 C_n^2 \omega^2)}{1 + R_n^2 C_n^2 \omega^2} \cdot \delta R_n \quad (3.25)$$

и

$$\delta_{R0}(C_n) = \frac{-2R_n^2 C_n^2 \omega^2}{1 + R_n^2 C_n^2 \omega^2} \cdot \delta C_n. \quad (3.26)$$

Для погрешности δ_{R0} весовой коэффициент относительного отклонения сопротивления резистора от номинального значения δR_n прямо пропорционален произведению $R_n C_n \omega$, а весовой коэффициент относительного отклонения емкости конденсатора δC_n изменяется от 0 до -2 при изменении емкости от 0 до значений, при которых произведение $R_n C_n \omega$ становится значительно больше 1 . Выявленные особенности изменения весового коэффициента могут явиться причиной ограничения верхней границы диапазона измерения СКС при

заданной точности измерения и должны быть учтены при выборе номинальных значений сопротивления резистора и емкости конденсатора.

Составляющие погрешности формирования реактивной составляющей сопротивления опорной ДЭЦ, обусловленные отклонением сопротивления опорного резистора и емкости опорного конденсатора от номинального значения, определяются, соответственно, выражениями

$$\delta_{X0}(R_n) = \frac{-2}{1 + R_n^2 C_n^2 \omega^2} \cdot \delta R_n, \quad (3.27)$$

$$\delta_{X0}(C_n) = \frac{1 - R_n^2 C_n^2 \omega^2}{1 + R_n^2 C_n^2 \omega^2} \cdot \delta C_n. \quad (3.28)$$

Для погрешности δ_{X0} весовой коэффициент относительного отклонения сопротивления резистора от номинального значения δR_n изменяется от -2 до 0 , а весовой коэффициент относительного отклонения емкости конденсатора δC_n от 1 до -1 при увеличении значения произведения $R_n C_n \omega$.

Оценки погрешности формирования амплитуды напряжения на опорной ДЭЦ и фазового сдвига между этим напряжением и напряжением питания измерительной схемы, обусловленные погрешностью формирования сопротивления опорной ДЭЦ, получены методом численного моделирования в программной среде Mathcard.

Для модуля и аргумента напряжения на опорной ДЭЦ имеем при использовании измерительной схемы в виде делителя напряжения имеем следующие зависимости:

$$U_0 = \frac{U_S}{(R_0 + R_X)^2 + (X_0 + X_X)^2} \cdot \sqrt{(R_0 \cdot (R_0 + R_X) + X_0 \cdot (X_0 + X_X))^2 - (X_0 \cdot (R_0 + R_X) + R_0 \cdot (X_0 + X_X))^2} \quad (3.29)$$

$$\phi = \arctg \left(\frac{X_0 \cdot X_X - R_0 \cdot R_X}{R_0 \cdot (R_0 + R_X) + X_0 \cdot (X_0 + X_X)} \right). \quad (3.30)$$

На рисунке 3.6 представлены графики зависимостей погрешности формирования амплитуды напряжения на опорной ДЭЦ δU_0 от погрешности формирования составляющей сопротивления опорной ДЭЦ δR_0 .

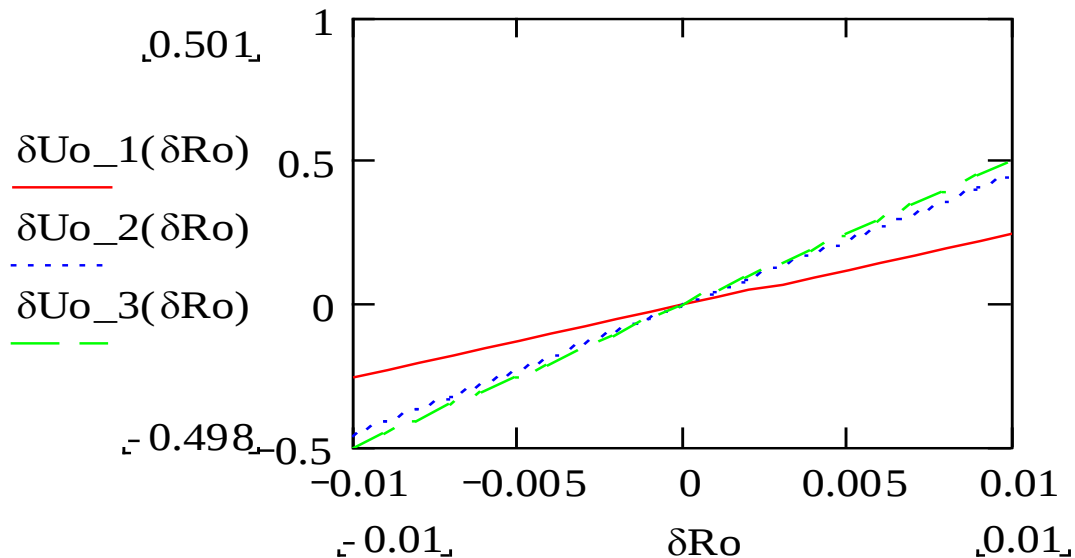


Рисунок 3.6 – Графики зависимостей погрешности формирования амплитуды напряжения на опорной ДЭЦ от погрешности формирования активной составляющей ее сопротивления

Диапазон изменения погрешности δR_0 формирования активной составляющей R_0 модуля сопротивления опорной ДЭЦ – $\pm 1\%$. Зависимости $\delta U_{0_1}(\delta R_0)$, $\delta U_{0_2}(\delta R_0)$, $\delta U_{0_3}(\delta R_0)$ имеют место при $z_X = z_0$, $z_X = 10z_0$, $z_X = 10^3 z_0$ соответственно, при $X_X = R_X = 10^8$ Ом, $X_0 = R_0$. Анализ графиков показывает, что погрешность формирования напряжения на опорной ДЭЦ увеличивается с увеличением отношения модулей измеряемого и опорного сопротивлений и не превышает половины погрешности формирования опорного сопротивления δR_0 .

На рисунке 3.7 представлены графики зависимостей погрешности формирования фазового сдвига напряжения на опорной ДЭЦ относительно напряжения питания измерительной схемы от погрешности формирования составляющей сопротивления опорной ДЭЦ δR_0 .

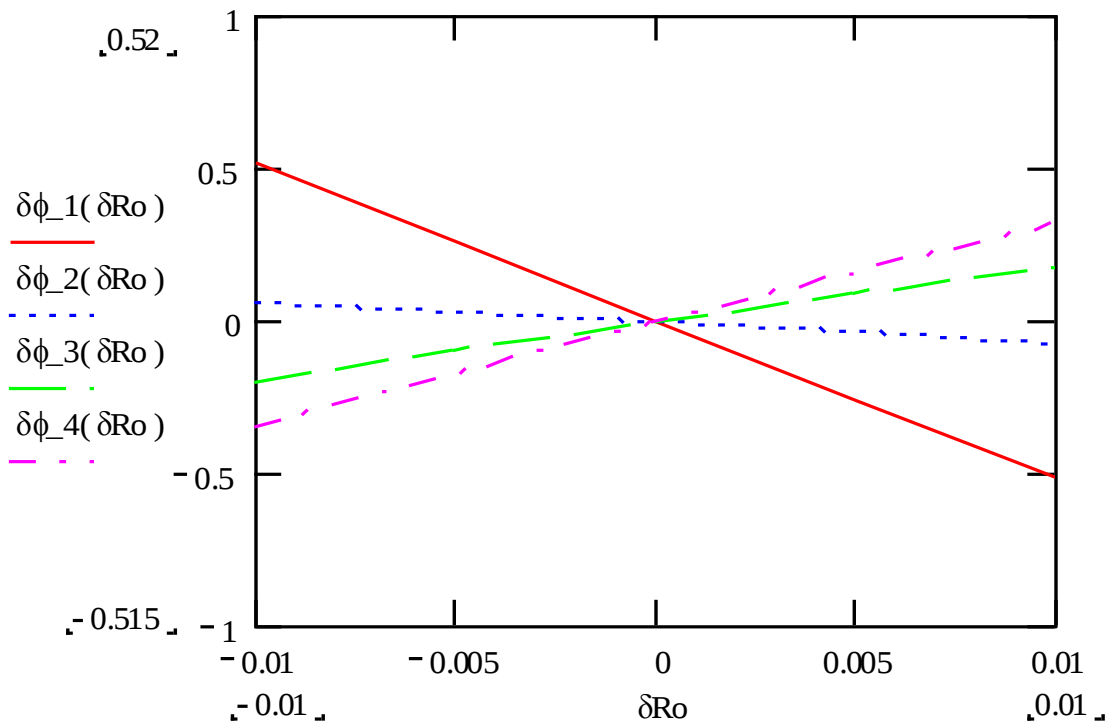


Рисунок 3.7 – Графики зависимостей погрешности формирования фазового сдвига напряжения на опорной ДЭЦ от погрешности формирования активной составляющей комплексного сопротивления R_0

Диапазон изменения погрешности формирования активной составляющей δR_0 модуля сопротивления опорной ДЭЦ – $\pm 1\%$.

Зависимости $\delta\phi_1(\delta R_0)$, $\delta\phi_2(\delta R_0)$, $\delta\phi_3(\delta R_0)$, $\delta\phi_4(\delta R_0)$ имеют место при $\operatorname{tg}\phi_0 = 0.07$ ($X_0 = 0.01X_X$), $\operatorname{tg}\phi_0 = 0.24$ ($X_0 = 0.25X_X$), $\operatorname{tg}\phi_0 = 0.333$ ($X_0 = 0.45X_X$), $\operatorname{tg}\phi_0 = 0.333$ ($X_0 = 0.5X_X$) соответственно. При этом $X_X = R_X = 10^8 \text{ Ом}$, $z_X = z_0$, $R_X = 10X_X$.

Анализ результатов численного моделирования зависимостей погрешностей измерения СКС, обусловленных погрешностями воспроизведения СКС опорных ДЭЦ позволяет сделать следующие выводы:

- в исследуемых диапазонах комплексных сопротивлений опорных ДЭЦ максимальное значение весового коэффициента погрешности формирования СКС опорной ДЭЦ как составляющей погрешности формирования амплитуды напряжения на опорной ДЭЦ составляет 0.5 и соответствует случаю $z_X \gg z_0$;

- максимальное значение весового коэффициента погрешности формирования СКС опорной ДЭЦ как составляющей погрешности формирования фазового сдвига напряжения на опорной ДЭЦ относительно напряжения питания измерительной схемы составляет 0.5 и соответствует случаю $\operatorname{tg} \phi_0 \rightarrow 0$ при $X_X = R_X$;

- минимизация погрешности формирования амплитуды напряжения на опорной ДЭЦ достигается увеличением модуля сопротивления опорной ДЭЦ до $Z_0 = Z_X$;

- минимизация погрешности формирования фазового сдвига напряжения на опорной ДЭЦ относительно напряжения на ИС достигается увеличением аргумента ϕ_0 комплексного сопротивления опорной ДЭЦ $\dot{Z}_0$.

3.6 МЕТОДИКИ МИНИМИЗАЦИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ ВЛИЯНИЕМ ВХОДНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ И ФАЗОВОГО СДВИГА, УСТРОЙСТВАМИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ СОСТАВЛЯЮЩИХ КОМПЛЕКСНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ БАЗОВЫХ СТРУКТУР

При измерении СКС высокоомных гетерогенных объектов модуль комплексного электрического сопротивления образца может превышать 10^{10} Ом. В таких случаях даже при напряжении питания измерительной 10 кВ амплитуда тока не превышает менее 1мкА. Для формирования напряжения на

опорной ДЭЦ в диапазоне 0,01 – 10 В требуются опорные ДЭЦ с модулем сопротивления более 10^5 Ом. Это значение сопротивления сравнимо с входным сопротивлением большинства современных интегральных АЦП напряжения и фазового сдвига.

В связи с этим шунтирование опорной ДЭЦ входным сопротивлением АЦП существенно изменяет состояние измерительной схемы, что является источником погрешности согласования, которая может становиться критической составляющей основной погрешности измерения СКС ДЭЦ. Это обуславливает актуальность задачи минимизации погрешности согласования при проектировании устройств для измерения СКС и напряжения на объекте измерения на основе пассивных измерительных схем [6].

В процессорных средствах измерений это может быть достигнуто путем введения соответствующих поправок в результаты измерений, если входное сопротивление АЦП известно. При измерении СКС ДЭЦ с измерением амплитуды напряжения измерительная схема в виде делителя напряжения с учетом входного сопротивления АЦП напряжения Z_V должна рассматриваться в виде, представленном на рисунке 3.8 [86].

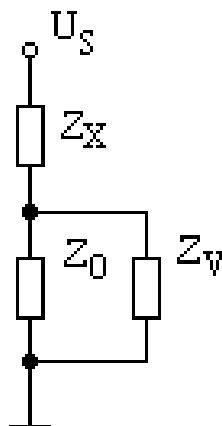


Рисунок 3.8 – Измерительная схема в виде делителя напряжения с учетом входного сопротивления АЦП напряжения

С учетом входного сопротивления АЦП вместо сопротивления опорной ДЭЦ $\dot{Z}_0$ при расчетах должно быть использована величина

$$\dot{Z}'_O = \frac{\dot{Z}_V \dot{Z}_O}{\dot{Z}_V + \dot{Z}_O}. \quad (3.31)$$

При использовании мостовой измерительной схемы нижнее плечо опорного делителя представляется в виде параллельного соединения опорной ДЭЦ и ДЭЦ с сопротивлением, равным входному сопротивлению АЦП напряжения. Эквивалентное сопротивление нижнего плеча определяется выражением

$$\dot{Z}'_{O2} = \frac{\dot{Z}_V \dot{Z}_{O2}}{\dot{Z}_V + \dot{Z}_{O2}}. \quad (3.32)$$

При измерении СКС ДЭЦ с измерением фазового сдвига с учетом входного сопротивления АЦП фазового сдвига измерительная схема имеет вид, представленный на рисунке 3.9.

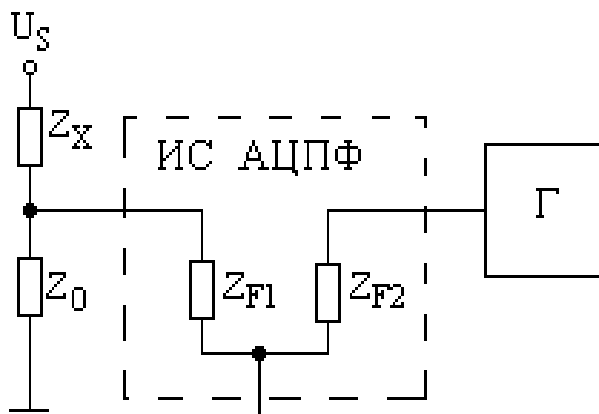


Рисунок 3.9 – Эквивалентная схема измерительной схемы в виде делителя напряжения при измерении фазового сдвига

На состояние измерительной схемы влияет только входное сопротивление первого входа АЦП фазового сдвига. Сопротивление нижнего плеча измерительного делителя с учетом входного сопротивления АЦП определяется как

$$\dot{Z}'_O = \frac{\dot{Z}_{F1} \dot{Z}_O}{\dot{Z}_{F1} + \dot{Z}_O}. \quad (3.33)$$

При использовании мостовой измерительной схемы на фазовый сдвиг влияют сопротивления обоих входов АЦП фазового сдвига (рисунок 3.10).

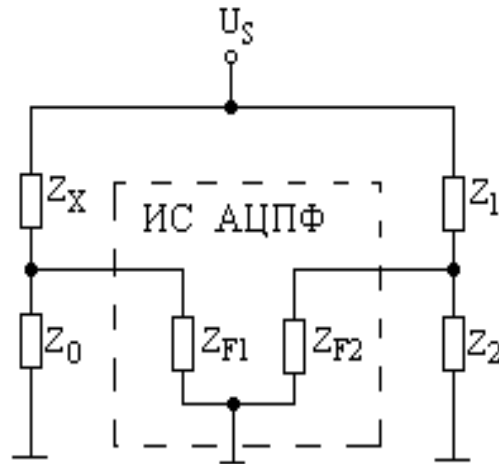


Рисунок 3.10 – Эквивалентная схема мостовой измерительной схемы при измерении фазового сдвига

Сопротивление нижнего плеча опорного делителя определяется в этом случае уравнением

$$\dot{Z}'_{O2} = \frac{\dot{Z}_{F2}\dot{Z}_{O2}}{\dot{Z}_{F2} + \dot{Z}_{O2}}. \quad (3.34)$$

Для способов измерений СКС ДЭЦ с измерением амплитуды напряжения и фазового сдвига на основе измерительных схем в виде делителя напряжения и мостовой ИС с учетом входных сопротивлений АЦП напряжения и АЦП фазового сдвига представлены, соответственно, на рисунках 3.11 и 3.12.

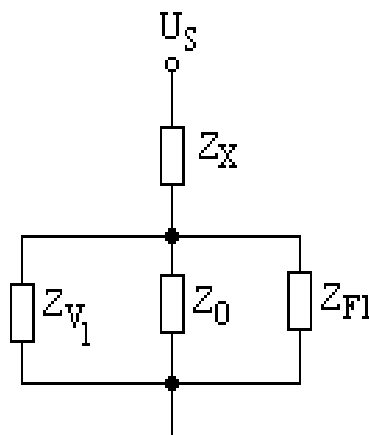


Рисунок 3.11 – Эквивалентная схема измерительной схемы в виде делителя напряжения при измерении напряжения и фазового сдвига

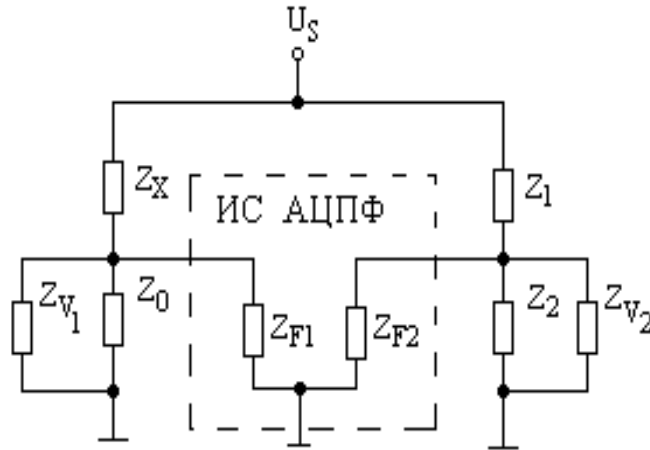


Рисунок 3.12 – Эквивалентная схема мостовой измерительной схемы при измерении напряжения и фазового сдвига

Для нижних плеч делителей при расчетах должны использоваться значения сопротивлений $\dot{Z}_{01VF}$ и $\dot{Z}_{02VF}$ соответственно.

$$\dot{Z}_{01VF} = \dot{Z}_{01V} \cdot \frac{\dot{Z}_{F1}}{\dot{Z}_{01V} + \dot{Z}_{F1}}; \quad (3.35)$$

$$\dot{Z}_{02VF} = \dot{Z}_{02V} \cdot \frac{\dot{Z}_{F2}}{\dot{Z}_{02V} + \dot{Z}_{F2}}. \quad (3.36)$$

Современный подход к измерениям входных сопротивлений цифровых измерительных приборов на переменном токе подробно изложен в работе [88]. Однако при измерении СКС гетерогенных объектов разработанными способами АЦП напряжения и АЦП фазового сдвига являются не автономными измерительными устройствами, а узлами более сложного устройства, например, канала информационно-измерительной системы. При этом на результат измерения влияют не только входное сопротивление применяемого АЦП, но и параметры электрических цепей, соединяющих АЦП с измерительной схемой, электрические параметры и конструкция электрических и магнитных экранов.

Отрицательное влияние всей совокупности этих факторов на точность измерения может быть ослаблено, если определить эквивалентное их воздействию входного сопротивления АЦП смонтированного измерительного устройства. В связи с этим разработаны методики измерений входных

сопротивлений АЦП напряжения и АЦП фазового сдвига без отключения от ИС с использованием мер сопротивления [87].

При реализации способов измерения СКС ДЭЦ с использованием АЦП напряжения, эквивалентное входное сопротивление АЦП, подключенного к измерительному делителю, определяется путем поочередного включения в измерительную ИС вместо исследуемой ДЭЦ двух образцовых резисторов с сопротивлениями R_1 и R_2 соответственно. В каждом состоянии ИС проводится измерение напряжения на опорной ДЭЦ. Активная R_V и реактивная X_V составляющие сопротивления $\dot{Z}_V$ находятся как решения системы уравнений

$$\begin{cases} W_1 = \frac{U_1^2}{U_S^2} = \frac{R_1^2 \cdot (R_V^2 + X_V^2)}{R_{01}^2 \cdot R_1^2 + 2 \cdot R_{01} \cdot R_1 \cdot X_V \cdot (R_{01} + R_1) + (R_{01} + R_2)^2 \cdot (R_V^2 + X_V^2)}, \\ W_2 = \frac{U_S^2}{U_S^2} = \frac{R_2^2 \cdot (R_V^2 + X_V^2)}{R_{01}^2 \cdot R_2^2 + 2 \cdot R_{01} \cdot R_2 \cdot X_V \cdot (R_{01} + R_2) + (R_{01} + R_2)^2 \cdot (R_V^2 + X_V^2)}. \end{cases} \quad (3.37)$$

Система имеет следующие решения:

$$R_V = \frac{R_0 \cdot (W_2 \cdot R_2 \cdot A - W_1 \cdot R_1^2 \cdot B)}{2 \cdot (W_1 \cdot R_1 \cdot (R_0 + R_1) \cdot B - W_2 \cdot R_2 \cdot (R_0 + R_2) \cdot A)} \quad (3.38)$$

$$X_V = \left[\frac{W_1}{A} \cdot (R_0^2 \cdot R_1^2 + 2 \cdot R_1 \cdot R_0 \cdot R_V \cdot (R_0 + R_1)) - R_V^2 \right]^{0.5},$$

$$\text{где } A = W_1 \cdot (R_0 + R_1)^2 - R_0^2, \quad B = W_2 \cdot (R_0 + R_2)^2 - R_0^2.$$

Для определения входного сопротивления АЦП напряжения, подключенного к опорному делителю достаточно одного образцового резистора. Первое уравнение системы получается с использованием первой опорной ДЭЦ делителя. Получаемая система уравнений отличается от (3.24) заменой величины R_1 на величину R_{01} .

При реализации способов измерения СКС ДЭЦ с измерением фазового сдвига составляющие R_F и X_F входного сопротивления АЦП фазы определяются как решения системы уравнений

$$\operatorname{tg} \phi_1 = \frac{X_F R_0 R_1}{R_F R_0 R_1 + (R_0 + R_1) \cdot (X_F^2 + R_F^2)} \quad (3.39)$$

и

$$\operatorname{tg} \phi_2 = \frac{X_F R_0 R_2}{R_F R_0 R_2 + (R_0 + R_2) \cdot (X_F^2 + R_F^2)}. \quad (3.40)$$

Система имеет следующие решения:

$$R_F = \frac{(\operatorname{tg} \phi_1 \cdot R_2 \cdot (R_0 + R_1) - \operatorname{tg} \phi_2 \cdot R_1 \cdot (R_0 + R_2)) \cdot A}{(R_0 + R_1) \cdot (A^2 + \operatorname{tg}^2 \phi_1 \cdot \operatorname{tg}^2 \phi_2 \cdot R_0^2 \cdot (R_2 - R_1)^2)} \quad (3.41)$$

$$X_F = R_X \cdot \frac{\operatorname{tg} \phi_1 \cdot \operatorname{tg} \phi_2 \cdot R_0 \cdot (R_2 - R_1)}{\operatorname{tg} \phi_1 \cdot R_2 \cdot (R_0 + R_1) - \operatorname{tg} \phi_2 \cdot R_1 \cdot (R_0 + R_2)},$$

где $A = \operatorname{tg} \phi_1 \cdot R_2 \cdot (R_0 + R_1) - \operatorname{tg} \phi_2 \cdot R_1 \cdot (R_0 + R_2)$.

При реализации способов измерения СКС ДЭЦ с измерением амплитуды и фазового сдвига необходимо при расчетах использовать значение сопротивления опорной ДЭЦ из уравнения

$$Z_0' = \frac{Z_0 \cdot Z_F \cdot Z_V}{Z_0 \cdot (Z_F + Z_V) + Z_F \cdot Z_V}. \quad (3.42)$$

Предлагаемые методики при использовании прецизионных образцовых резисторов с пренебрежимо малым реактивным сопротивлением позволяет снизить составляющую основной погрешности измерения СКС, обусловленную конечным значением входного сопротивления применяемых АЦП до значения, близкого к основной погрешности измерения СКС для АЦП с бесконечно большим входным сопротивлением.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

1 Систематизация вариантов структуры процесса совместных измерений СКС и напряжения на объекте измерения устройства для измерения СКС и напряжения на объекте измерения по признакам «Тип измерительной схемы», «Вид измерения», «Измеряемый параметр выходного сигнала измерительной схемы», «Измерение параметров напряжения питания» позволила выявить

шесть базовых структур процесса совместных измерений СКС и напряжения на объекте измерения.

2 Разработанные способы измерений СКС ДЭЦ с измерениями амплитуды напряжения и (или) фазового сдвига позволяют проводить совместные измерения СКС объекта измерения, амплитуды и частоты синусоидального напряжения на объекте измерения на основе мостовой измерительной схемы и измерительной схемы в виде делителя напряжения, что дает возможность измерять ПКС гетерогенных объектов в рабочих режимах, в частности, при питании измерительной схемы от источника с ненормированными метрологическими характеристиками.

3 Разработаны базовые структуры устройства для измерений СКС и напряжения на объекте измерения на основе мостовой измерительной схемы с измерениями амплитуды синусоидального напряжения в средних точках измерительного и опорного делителей и (или) фазового сдвига между этими напряжениями. Данные структуры рекомендуются при повышенных требованиях к быстродействию измерительных устройств.

4 Разработаны базовые структуры устройства для измерений СКС и напряжения на объекте измерения на основе измерительной схемы в виде делителя напряжения. Данные структуры рекомендуются при измерениях ПКС гетерогенных объектов при высоких рабочих напряжениях, поскольку позволяют использовать меры ПКС с допустимым напряжением меньше рабочего напряжения на объекте измерения.

5 Сформирована совокупность базовых структур устройства для измерения СКС и напряжения на объекте измерения на основе мостовой измерительной схемы и измерительной схемы в виде делителя напряжения. Разработаны рекомендации по выбору базовой структуры измерительного устройства при решении конкретной измерительной задачи.

6 Проведен анализ погрешностей измерения СКС, обусловленных погрешностями воспроизведения СКС опорных ДЭЦ, даны рекомендации по

их минимизации при разработке измерительных устройств на основе базовых структур.

7 Разработаны методики минимизации систематических составляющих погрешностей измерений СКС измерительными устройствами на основе базовых структур, обусловленных влиянием входных сопротивлений АЦП напряжения и АЦП фазового сдвига.

ГЛАВА 4

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ КОМПЛЕКСНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ С УЛУЧШЕННЫМИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ И МЕТРОЛОГИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Улучшение функциональных и метрологических характеристик средств измерений достигается синергетическим эффектом их развития в двух направлениях: разработка измерительных преобразователей и структур на их основе с улучшенными метрологическими характеристиками и совершенствование метрологически значимого программного обеспечения.

Качество программного обеспечения достигается соответствием математического обеспечения средства измерений специфике программной обработки измерительной информации при решении конкретной измерительной задачи. При измерении ПКС гетерогенных объектов в рабочих режимах возникают задачи спектрального анализа измерительных сигналов. Оперативное решение таких задач непосредственно в процессе измерения позволяет расширить функциональные возможности измерительных приборов и систем и улучшить их метрологические характеристики.

При измерениях ПКС гетерогенного объекта питание измерительной схемы осуществляется синусоидальным напряжением, а переходные процессы, неизбежно возникающие в пассивных измерительных схемах, носят затухающий экспоненциальный характер. Для анализа таких процессов целесообразно использовать методы спектрального оценивания.

С применением метода спектрального оценивания разработан способ измерения нормируемых параметров высоковольтных электроизоляторов под рабочим напряжением при обслуживании энергетического оборудования по состоянию с использованием пассивной измерительной схемы с двумя опорными элементами. Способ основан на измерении амплитуд первой и

второй гармоник рабочего напряжения на опорных элементах измерительной схемы и нахождении сопротивления и емкости электроизолятора как решений системы уравнений состояния.

Нестабильность частоты синусоидального напряжения питания измерительной схемы в рабочих режимах является во многих случаях источником значимой составляющей погрешности измерения ПКС гетерогенного объекта. С целью минимизации этой составляющей погрешности измерения предложена оригинальная структура прецизионного быстродействующего частотомера для измерения частоты как величины, обратной периоду синусоидального напряжения.

Существующие вторичные измерительные преобразователи ПКС в напряжение постоянного тока осуществляют преобразование при питании измерительной схемы импульсным напряжением, что не позволяет использовать их для измерений ПКС гетерогенных объектов. Разработана оригинальная структура преобразователя «модуль комплексного сопротивления – напряжение» с синусоидальным напряжением на объекте и максимальной для данного класса преобразователей чувствительностью, обладающий устойчивостью к низкочастотным по сравнению с частотой питания измерительной схемы шумам.

Существенное влияние температуры как параметра рабочего режима на свойства гетерогенного объекта ПКС обусловило необходимость разработки цифровых термометров на основе термометров сопротивления и термоэлектрических преобразователей. Предложены оригинальные структуры устройств для измерения температуры с использованием широкой номенклатуры датчиков температуры.

Основные результаты исследований, представленные в данной главе опубликованы в статьях [6, 60, 90–93].

4.1 ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ СПЕКТРАЛЬНОГО ОЦЕНИВАНИЯ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КОМПЛЕКСНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННОГО ОБЪЕКТА В РАБОЧИХ РЕЖИМАХ

Широко применяемый метод спектрального оценивания Фурье обладает низкой точностью при анализе измерительных сигналов, в состав которых входят колебательные компоненты, частоты которых являются не кратными, а амплитуда изменяется экспоненциально, что имеет место при питании пассивной измерительной схемы устройства для измерения СКС от источника синусоидального напряжения с ненормированными метрологическими характеристиками. Это связано с такими недостатками классического преобразования Фурье для данного применения, как «размывание» частотной информации из-за эффекта конечной длины и, как следствие, невозможность точного измерения частоты; ограничение частотного разрешения, т.е. способности различать спектральные линии двух или более составляющих; явление «утечки» – просачивание на соседние гармоники, что приводит к искажению спектра [94].

Для решения данного типа задач предпочтительно использовать аппроксимацию эквидистантного ряда отсчетов измерительного сигнала суммой экспонент (конечная сумма Дирихле) вида

$$P(t) = \sum_{k=1}^n a_k e^{\alpha_k t}, \quad (4.1)$$

где параметры c_k и α_k , в общем случае, являются комплексными числами, а показатели α_k удовлетворяют условию $\operatorname{Re} \alpha_k \leq 0$ для всех k , $k \leq 2n$.

Известно два основных метода расчета параметров компонент аппроксимирующего агрегата – метод наименьших квадратов Прони и *QD*-алгоритм частных и разностей Рутисхаузера [95]. Основным достоинством *QD*-алгоритма является простота реализации, в том числе и на микроконтроллерах. В то же время точность аппроксимации сигнала с использованием *QD*-алгоритма зависит от шумов, неизбежно сопровождающих аналоговые сигналы

$F(t)$,

а также от шума квантования, так как аппроксимирующая функция совпадает в точках аппроксимации с сигналом с наложенными на него шумами. Наличие шумов приводит также в ряде случаев к неустойчивости алгоритма [96].

Алгоритм Прони в этом отношении предпочтительнее, так как вследствие двукратного применения метода наименьших квадратов на различных этапах реализации алгоритма, обладает свойством подавления шума, в том числе и шума квантования. Последнее позволяет применять для оцифровки переменных сигналов $F(t)$ малоразрядные быстродействующие аналого-цифровые преобразователи без потерь точности полученных результатов.

В настоящее время известен ряд методов цифровой обработки измерительной информации в процессе решения различных измерительных задач, среди которых выделяется метод наименьших квадратов Прони (МНК Прони), позволяющий восстанавливать сигнал не только по авторегрессионным коэффициентам, но и по параметрам разложения [58, 97].

В МНК Прони используется модель в виде суммы колебательных составляющих разной частоты f_i с соответствующими амплитудами U_i , фазами ϕ_i и затуханиями α_i :

$$y(t) = \sum_{j=1}^p U_j \cdot e^{-\alpha_j t} \cos(2\pi \cdot f_j \cdot t + \phi_j). \quad (4.2)$$

Модель (4.2) позволяет оценивать параметры следующих составляющих измерительных сигналов и их линейные комбинации: постоянные составляющие ($f_i=0$ и $\alpha_i=0$), экспоненциальные составляющие ($f_i=0$), гармонических составляющих ($\alpha_i=0$), гармонически затухающие составляющие.

Как и во всех параметрических методах, в основе метода Прони лежит представление дискретной последовательности отсчетов (мгновенных значений) сигнала в виде линейного разностного уравнения

$$y_i = \sum_{m=1}^q b_m x_{i-m} - \sum_{k=1}^p a_k y_{i-k}, \quad (4.3)$$

где x_i и y_i – значения дискретных отсчетов входной и выходной последовательностей описываемого процесса, a_k , где $k = 1, 2, \dots, p$ и b_m , где $m = 1, 2, \dots, q$ коэффициенты регрессии, оцениваемые по методу наименьших квадратов.

При косвенных измерениях, в частности измерениях СКС, уравнение (4.3) может быть представлено в виде

$$y_i = - \sum_{k=1}^p a_k y_{i-k}. \quad (4.4)$$

Передаточная функция $G(z)$ процесса, описываемого уравнением (4.2), определяется рациональным выражением через Z –преобразования его частей, описывающих соответственно его вход x_i и выход y_i :

$$G(z) = \frac{\sum_{m=1}^q b_m \cdot z^{-m}}{1 + \sum_{k=1}^p a_k \cdot z^{-k}}. \quad (4.5)$$

При известных коэффициентах a_k полюса этой передаточной функции могут быть найдены из решения характеристического уравнения

$$1 + \sum_{k=1}^p a_k z^{-k} = 0 \quad (4.6)$$

При реализации метода Прони модель (4.2) преобразуется в сумму комплексных экспонент:

$$\begin{aligned} y_i &= \sum_{j=1}^p U_j e^{\alpha_j |\Delta t|} e^{j(2\pi f_j \Delta t + \phi_j)} = \\ &= \sum_{j=1}^p U_j e^{j\phi_j} \cdot e^{(\alpha_j \pm j2\pi f_j) \Delta t} = \sum_{j=1}^p h_j z_j^i, \end{aligned} \quad (4.7)$$

где $z_i = e^{(\alpha_i \pm j2\pi f_i)\Delta t}$ – корни характеристического уравнения, $h_i = U_i e^{j\phi_i}$ – комплексные амплитуды.

Комплексная амплитуда h_i представляет собой параметр, независимый от времени, а z_i – комплексная экспонента, которая описывает параметр, зависящий от времени.

Для определения параметров гармонического колебания минимально необходимо четыре отсчета. Для зашумленного сигнала необходимо согласовать решение со всеми данными. В этом случае при реализации метода Прони находят значения величин U_i , a_i , f_i , ϕ_i , минимизирующие среднеквадратическую ошибку

$$\sigma^2 = \sum_{i=0}^{N-1} |y_i - \tilde{y}_i|^2. \quad (4.8)$$

Следовательно, применив МНК для решения системы из $(N-p)$ уравнений с p неизвестными, можно найти коэффициенты авторегрессии a_k , $k=1,2,\dots,p$ модели (4.4).

При использовании МНК среднеквадратическая ошибка минимальна, когда ее частные производные по всем переменным равны нулю:

$$\frac{\partial \sigma^2}{\partial a_k} = 0. \quad (4.9).$$

Среднеквадратическая ошибка (4.8) может быть записана в виде

$$\sigma^2 = \sum_{i=0}^{N-1} |y_i - (a_1 \cdot y_{i-1} + \dots + a_k \cdot y_{i-k} + \dots + a_p \cdot y_{i-p})|^2. \quad (4.10)$$

Частная производная среднеквадратической ошибки может быть описана формулой:

$$\frac{\partial \sigma^2}{\partial a_k} = 2 \sum_{i=0}^{N-1} |y_i \cdot y_{i-k} - (a_1 \cdot y_{i-1} \cdot y_{i-k} + \dots + a_k \cdot y_{i-k} \cdot y_{i-k} + \dots + a_p \cdot y_{i-p} \cdot y_{i-k})|. \quad (4.11)$$

Система уравнений имеет вид

$$\begin{cases} \sum_{i=0}^{N-1} a_1 \cdot y_{i-1} \cdot y_{i-1} + \dots + a_k \cdot y_{i-k} \cdot y_{i-1} + \dots + a_p \cdot y_{i-p} \cdot y_{i-1} = \sum_{i=0}^{N-1} y_i \cdot y_{i-1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \sum_{i=0}^{N-1} a_1 \cdot y_{i-1} \cdot y_{i-k} + \dots + a_k \cdot y_{i-k} \cdot y_{i-k} + \dots + a_p \cdot y_{i-p} \cdot y_{i-k} = \sum_{i=0}^{N-1} y_i \cdot y_{i-k} \\ \cdot \\ \cdot \\ \sum_{i=0}^{N-1} a_1 \cdot y_{i-1} \cdot y_{i-p} + \dots + a_k \cdot y_{i-k} \cdot y_{i-p} + \dots + a_p \cdot y_{i-p} \cdot y_{i-p} = \sum_{i=0}^{N-1} y_i \cdot y_{i-p} \end{cases} \quad (4.12)$$

Программными средствами систему линейных уравнений удобно решать методом Гаусса. Систему уравнений представляют в матричной форме:

$$\begin{pmatrix} \sum_{i=0}^{N-1} y_{i-1} \cdot y_{i-1} \dots \sum_{i=0}^{N-1} y_{i-1} \cdot y_{i-k} \dots \sum_{i=0}^{N-1} y_{i-1} \cdot y_{i-p} \\ \cdot \\ \cdot \\ \sum_{i=0}^{N-1} y_{i-k} \cdot y_{i-1} \dots \sum_{i=0}^{N-1} y_{i-k} \cdot y_{i-k} \dots \sum_{i=0}^{N-1} y_{i-k} \cdot y_{i-p} \\ \cdot \\ \cdot \\ \sum_{i=0}^{N-1} y_{i-p} \cdot y_{i-1} \dots \sum_{i=0}^{N-1} y_{i-p} \cdot y_{i-k} \dots \sum_{i=0}^{N-1} y_{i-p} \cdot y_{i-p} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ a_k \\ \cdot \\ \cdot \\ a_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=0}^{N-1} y_i \cdot y_{i-1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \sum_{i=0}^{N-1} y_i \cdot y_{i-k} \\ \cdot \\ \cdot \\ \sum_{i=0}^{N-1} y_i \cdot y_{i-p} \end{pmatrix} \quad (4.13)$$

Для модели (4.5) характеристическим является уравнение

$$z^p + a_1 z^{p-1} + \dots + a_p = 0. \quad (4.14)$$

После нахождения корней характеристического уравнения можно определить амплитуды h_i аппроксимирующей функции (4.7).

Алгоритм определения параметров сигнала (рисунок 4.1), основанный на методе Прони, включает следующие шаги:

Шаг 1. Выбор порядка p модели (4.2) и определение коэффициентов регрессии a_k уравнения (4.3) или (4.4) по результатам измерений;

Шаг 2. Решение степенного характеристического уравнения и определение по его корням собственных частот и декрементов затухания всех p составляющих сигнала:

$$f_i = \arctg \left[\frac{\operatorname{Im}(z_i)}{\operatorname{Re}(z_i)} \cdot \frac{1}{2\pi\Delta t} \right], \quad \alpha_i = \frac{\ln|z_i|}{\Delta t}. \quad (4.15)$$

Шаг 3. Нахождение комплексных амплитуд из выражения (4) и определение по ним амплитуд и начальных фаз p составляющих сигнала:

$$U_i = |h_i|, \quad \phi_i = \arctg \frac{\operatorname{Im}(h_i)}{\operatorname{Re}(h_i)}. \quad (4.16)$$

При $N = 2p$ процедура Прони точно согласует экспоненциальную кривую, содержащую p членов, с результатами измерений, при $N > 2p$ речь идет об аппроксимации.

Наибольшую сложность при цифровой обработке сигналов на основе метода Прони представляет решение характеристического уравнения на втором этапе алгоритма. Степень уравнения зависит от выбранного (оцененного) порядка модели. Исключить этап оценки порядка аппроксимирующей модели возможно, используя методы разложения сигнала на знакопеременные составляющие – метод экстремальной фильтрации и метод разложения на эмпирические моды (преобразование Гильберта-Хуанга), при этом каждой из выделенных составляющих будет соответствовать второй порядок аппроксимирующей модели. [98, 99]. Предварительное разложение сигнала на гармонические и (или) гармонически затухающие составляющие позволяет упростить реализацию обработки сигнала методом Прони, так как требует решения характеристического уравнения не выше второго порядка.

При определении методической погрешности цифровой обработки измерительного сигнала целесообразно принять оценку:

$$\sigma_{восст} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \tilde{y}_i)^2 / N}}{y_{\max}} \cdot 100\%, \quad (4.17)$$

где $\tilde{y}_i$ – значения аппроксимирующей кривой, N – количество отсчётов.

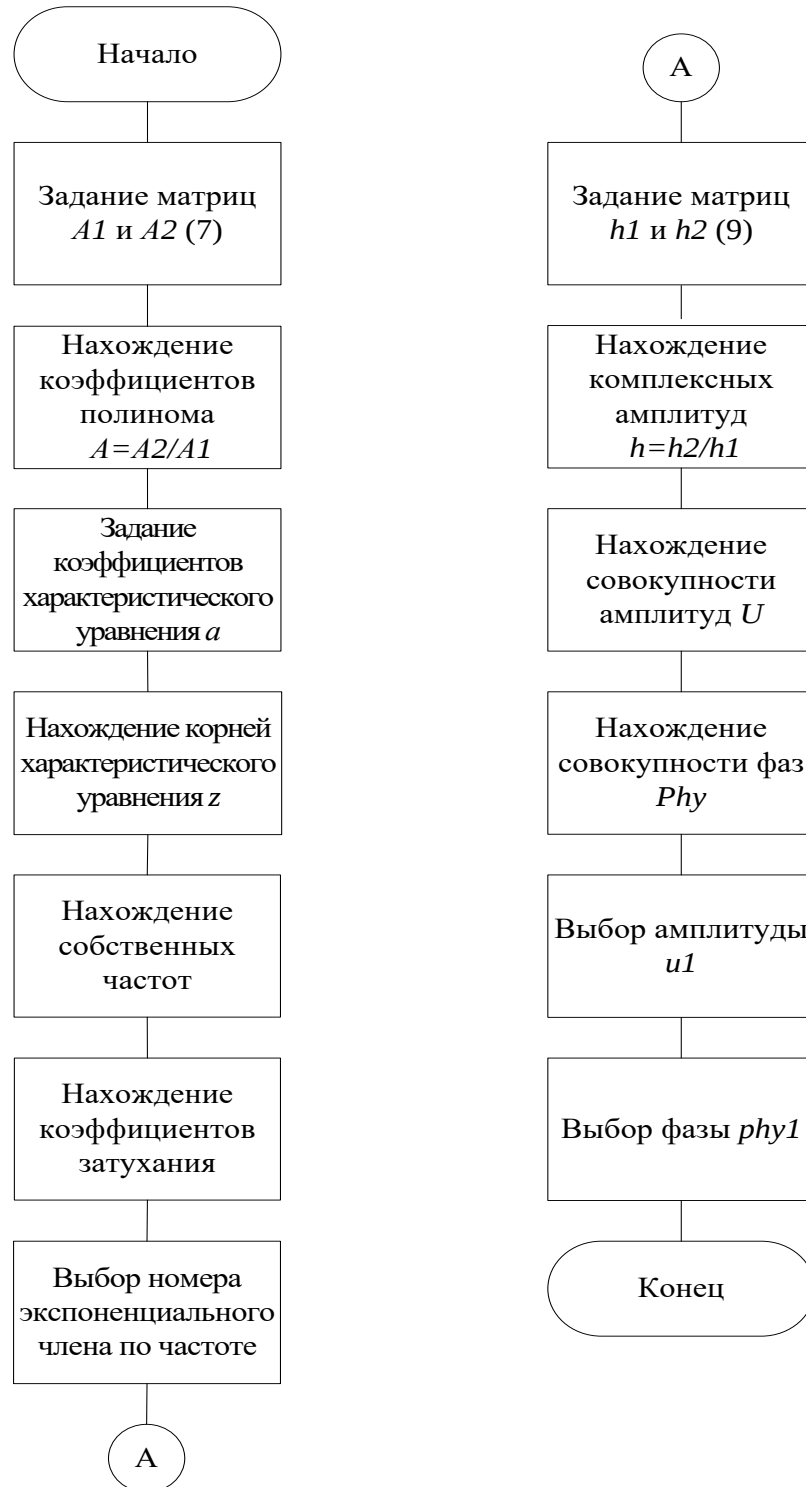


Рисунок 4.1 – Алгоритм процедуры Прони

За счет аппроксимации сигнала по методу наименьших квадратов происходит подавление шумов квантования АЦП напряжения. Предел приведенной погрешности определения амплитуды и частоты составляет соответственно $\pm 0,05\%$ и $\pm 0,1\%$ при использовании 8-разрядного АЦП критериев [100]. Использование 16-разрядного АЦП позволяет снизить погрешность на два порядка. В некоторых задачах, при наличии априорной информации о частоте исследуемого сигнала, погрешность измерения амплитуды можно снизить ее в 10 раз за счет исключения первых двух шагов алгоритма.

Метода Прони применен к задаче измерения параметров сетевого напряжения на выходе неисправного понижающего трансформатора, исказившего форму сигнала, осциллограмма которого представлена на рисунке 4.2 [90]. Исходная выборка объемом 2048 отсчетов получена цифровым запоминающим осциллографом TDS 1002B.

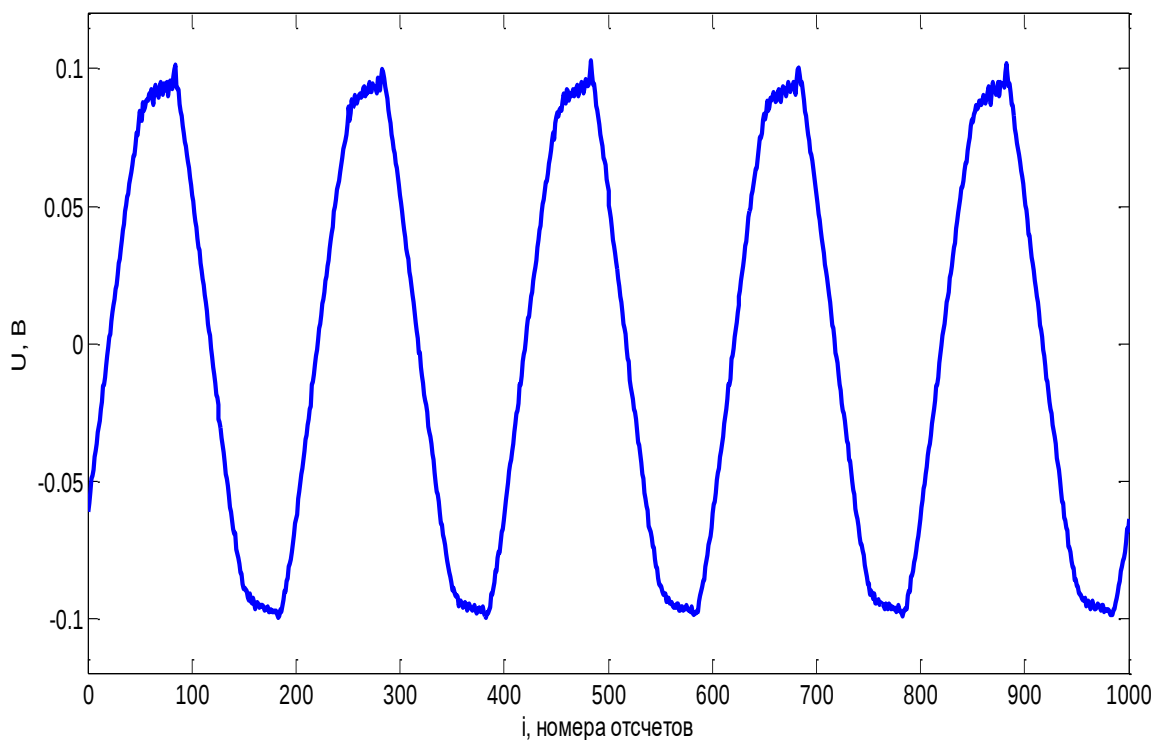


Рисунок 4.2 – Осциллограмма сетевого напряжения, зарегистрированная цифровым осциллографом TDS 1002B

Для оценки погрешности измерения параметров зарегистрированного сигнала использовалась модель (4.2). Порядок модели p был принят равным 14, т.е. модель сигнала являлся суммой семи колебательных составляющих. Нижняя, самая низкочастотная составляющая, представляет собой первую гармонику спектра сигнала.

Среднеквадратическое отклонение модели сигнала от исходных данных составило $\pm 0,5\%$ от амплитуды сигнала. На рисунке 4.3 изображены осциллограммы фрагмента зарегистрированного исходного сигнала (показан точками) и модельного сигнала (показан сплошной линией). Затем методом Прони оценивались амплитуда и частота первой гармоники именно модельного сигнала с известными параметрами: частота 49,49 Гц, амплитуда 0,11 В.

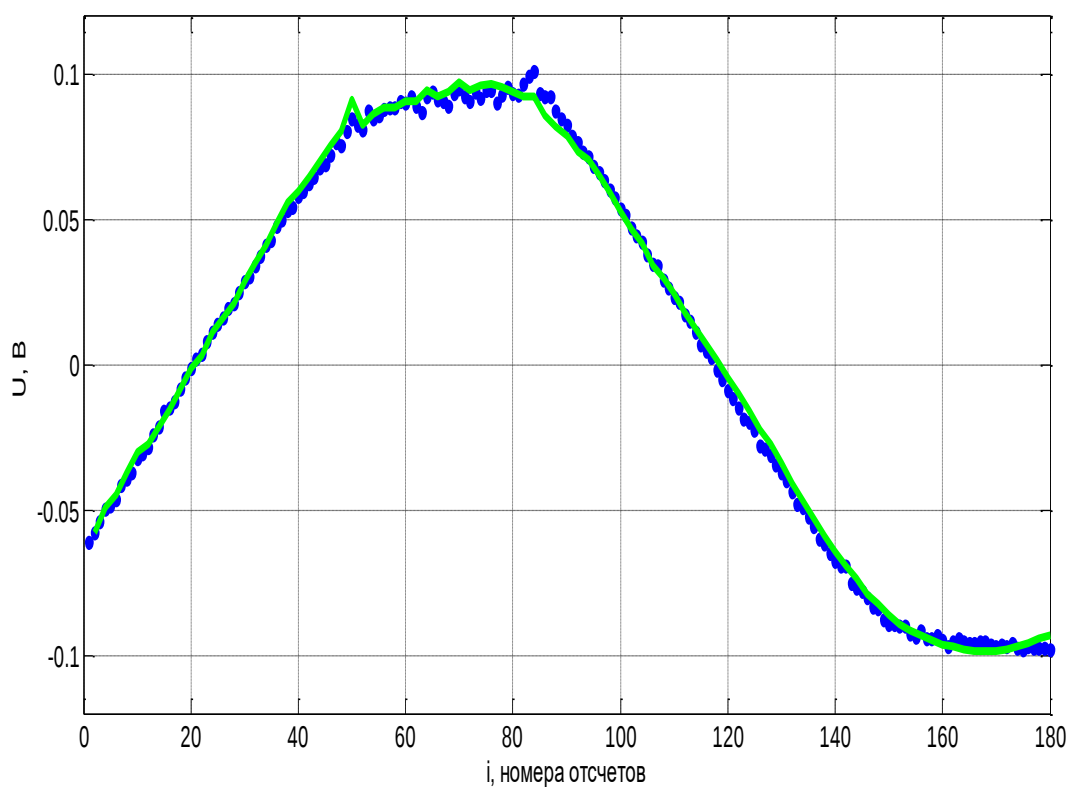


Рисунок 4.3 – Осциллограммы фрагмента зарегистрированного исходного сигнала (показан точками) и модельного сигнала (показан сплошной линией)

При обработке нестационарных измерительных сигналов, формирующихся при измерениях ПКС объектов, функционирующих в рабочих

режимах, эффективен метод декомпозиции на эмпирические моды (EMD – Empirical Mode Decomposition) [101].

Декомпозиция на эмпирические моды – разложение исходного сигнала на функции, удовлетворяющие необходимым условиям:

- число экстремумов сигнала равняется числу нулей с точностью до 1;
- полусумма верхней огибающей, интерполирующей локальные максимумы, и нижней огибающей, интерполирующей локальные минимумы, близка к нулю.

Так как при использовании метода декомпозиции на эмпирические моды сжатие данных осуществляется за счет хранения значений сигнала в точках экстремумов, число которых в исследуемом сигнале заранее неизвестно, целесообразным является рассмотрение методики обработки измерительного сигнала на основании декомпозиции на эмпирические моды с последующим применением к каждой из выделенных составляющих метода Прони.

Использование такой комбинации методов, модифицированного метода Прони (EMD+Прони), позволяет практически решить некоторые проблемы, возникающие при применении метода Прони [102]:

- уменьшается критичность результата анализа к порядку модели (порядок каждой моды равен 2, или максимум 3);
- уменьшается трудоемкость вычислений параметров составляющих (для каждой моды этот процесс сводится к решению квадратных или кубических уравнений);
- появляется возможность отсеивания шумовой компоненты еще до применения метода Прони.

Вариант совместного применения метода Прони и EMD-разложения может выглядеть следующим образом:

1. Используя метод EMD, получить разложение сигнала на экспериментальные моды.
2. Провести процесс отбора значимых мод.

3. С помощью метода Прони обработать каждую полученную моду и рассчитать их характеристики

Другим перспективным методом обработки нестационарных сигналов является метод экстремальной фильтрации, который состоит в разложении исследуемого сигнала на знакопеременные составляющие, каждая из которых может быть отнесена к определенной полосе частот [92].

Разложение измерительного сигнала на знакопеременные составляющие строится на том факте, что экстремумы сигнала несут информацию о самой высокочастотной узкополосной составляющей [97]. После удаления этой составляющей из сигнала остается сглаженная кривая, экстремумы которой несут информацию о следующей узкополосной составляющей, дальнейший анализ сигнала производится аналогичным образом [103].

Алгоритм разложения сигнала на колебательные и затухающие составляющие методом экстремальной фильтрации включает следующие этапы:

1 Выделение из сигнала максимальные значения функции в некоторой области, т.е. экстремумы, а также определяем интервалы времени между значениями экстремумов.

2 Удаление высокочастотной составляющей с помощью цифрового фильтра нижних частот

3 Определение разности между измеряемым сигналом и суммой выделенных составляющих.

5. Определение параметров составляющих сигнала по значениям экстремумов и интервалов между ними.

6. Повторение действий по пунктам 1–3 пока последовательность экстремумов не станет знакопеременной или будет представлять собой тренд.

Вариант совместного применения методов Прони и экстремальной фильтрации может выглядеть так же, как и в случае совместного применения метода Прони с EMD-разложением. При этом процедуру описания каждой из знакопеременных составляющих колокольными функциями можно опустить –

для поиска параметров каждой из составляющих по методу Прони будет достаточно иметь значения только их экстремумов.

Анализ процесса обработки измерительной информации методом Прони позволил выявить следующие составляющие методической погрешности измерения:

- погрешность квантования;
- погрешность дискретизации;
- погрешность аппроксимации;
- погрешность, обусловленная конечным временем наблюдения;
- погрешность, обусловленная некрatностью длительности интервала времени наблюдения и периода сигнала;
- погрешность, обусловленная начальной фазой сигнала

Одним из основных параметров алгоритма обработки информации методом Прони является порядок модели, определяющий погрешность аппроксимации. Для измерения параметров синусоидального сигнала теоретически достаточно модели второго порядка. На практике измерительный сигнал, подвергаемый процедуре Прони, представляет собой сумму истинного сигнала, случайного и стационарного шума. Моделирование, при отношении сигнал/шум q равным 100, показало, что при $p = 2$ погрешность определения амплитуды составляет $\pm 2\%$, погрешность определения начальной фазы – $\pm 0,2\%$, при $p=4$ погрешности устанавливаются на уровнях $\pm 0,2\%$ и $\pm 0,1\%$, соответственно, и не изменяются при дальнейшем увеличении порядка p .

Аналогичный результат получен для модели сигнала в виде суммы 3 гармонических колебаний и шума (теоретически минимальный порядок модели $p = 6$). Погрешности определения амплитуды при $p=6$ составляет $\pm 1,2\%$, погрешность фазового сдвига – $\pm 0,25\%$. Погрешности достигают минимальных значений $\pm 0,2\%$ и $\pm 0,1\%$, соответственно, при $p = 10$ и не изменяются при дальнейшем увеличении порядка p .

Анализ показывает, что при заданной качественной модели сигнала (число гармонических составляющих и характеристики шума) для достижения минимальных погрешностей определения его параметров порядок модели следует принимать на 4–6 единиц больше теоретически минимального.

Погрешность, обусловленная конечным временем наблюдения, определяется соотношением периода дискретизации (длительность аналого-цифрового преобразования), длительности интервала времени наблюдения и периода сигнала. Моделирование показало, что данная составляющая погрешности также имеет минимальное значение на некотором интервале, но этот интервал ограничен как снизу, так и сверху. Для сигнала, состоящего из одной гармоники и шума, нижняя граница интервала четко определяется соотношением $T/\Delta t = 4$. Из-за наличия в сигнале шума положение верхней границы зависит от допустимой погрешности. Допустимой относительной погрешности $\pm 1\%$ соответствует соотношение $T/\Delta t = 100$.

Для сигнала, образованного тремя гармоническими составляющими и шумом, верхняя граница не изменяется, $T/\Delta t = 4$, а нижняя граница смещается до $T/\Delta t = 45$. Увеличение числа гармонических составляющих, выделяемых из сигнала сужает интервал значений отношения $T/\Delta t$, в котором погрешность, обусловленная конечностью интервала наблюдения, пренебрежимо мала. Аналогичные результаты получены при моделировании с фиксацией числа периодов измеряемого сигнала и варьировании частоты дискретизации.

При исследовании влияния числа разрядов АЦП на погрешность определения амплитуды и начальной фазы измеряемого сигнала все другие параметры задавались таким образом, чтобы обеспечить значения других составляющих погрешности близкими к минимальным и исключить зависимость получаемых результатов от них. При моделировании сигнала, имеющего одну гармоническую составляющую, было принято: $q = 100$, $N = 150$, $n = 35$, $p = 8$.

Во втором случае, когда сигнал представляет собой сумму трех гармонических составляющих, были приняты: $q = 100$, $N = 150$, $n = 25$, $p = 12$.

Моделирование показало, что оптимальное число разрядов АЦП, т.е. число, превышение которого не приводит к уменьшению погрешности, зависит от соотношения сигнал/шум. При заданном соотношении сигнал/шум 100, погрешность стабилизируется на уровне 0,2–0,25 % при использовании АЦП, имеющих разрядность не менее 10.

Исследование влияния начальной фазы сигнала на результаты обработки данных по методу Прони связано с проверкой гипотезы о независимости точности обработки от этого параметра сигнала, в отличие от преобразования Фурье на конечном интервале. Моделирование показало, что изменение начальной фазы сигнала не влияет на оценки погрешности на уровне 0,2–0,25 %.

При исследовании помехоустойчивости метода Прони стационарная помеха моделировалась двумя гармоническими колебаниями с частотой больше и меньше частоты измеряемого сигнала. От соотношения частот стационарных помех и частоты измеряемого сигнала зависит точность определения его амплитуды и начальной фазы.

Моделирование показало, что при близости частот измеряемого сигнала и помехи погрешности резко возрастают. Установлено, что применение алгоритма обработки данных по методу Прони имеет смысл при разнице частот не менее, чем 0,3 от измеряемой частоты.

Для удобства сравнительного анализа функциональных и метрологических характеристик (k -коэффициент сжатия, t -время обработки, σ – погрешность восстановления сигнала, δf - относительная погрешность измерения частоты, δU -относительная погрешность измерения амплитуды) двух предложенных методов построены диаграммы, визуально отображающие сравнительные характеристики алгоритмов обработки сигналов на основе методов Прони и EMD + Прони (рисунок 4.6). Вертикальная ось диаграммы имеет

относительную размерность, за единицу выбраны значения характеристик метода EF +Прони.

Диаграммы позволяют выбрать метод в зависимости от требований, предъявляемых к ИИС. Из диаграмм видно, что модифицированный метод позволяет увеличить коэффициент сжатия как минимум в 2 раза по сравнению с классическим МНК Прони, метод EMD +Прони обладает оптимальным соотношением между быстродействием и уровнем погрешности восстановления сигнала.

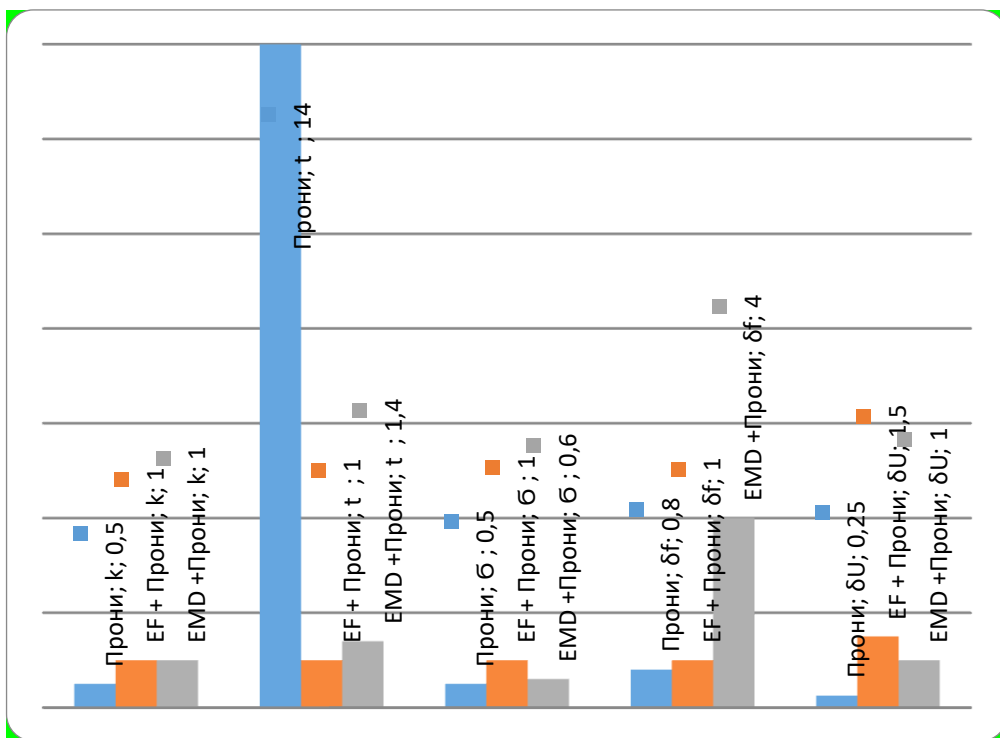


Рисунок 4.6 – Сравнительные характеристики алгоритмов обработки сигналов на основе методов Прони и EMD + Прони

Установлено, что по исследованным характеристикам модифицированный метод Прони превосходит традиционный, поэтому целесообразно рассмотреть функциональные и метрологические характеристики именно этого метода спектрального оценивания.

При исследовании применялась следующая дискретная модель измерительного сигнала:

$$u_i = \sum_{m=1}^p U_m \cdot \cos(2\pi \cdot i \cdot \Delta t \cdot f_m + \phi_m) + \xi_i \cdot \frac{1}{q}, i=1 \dots N, \quad (4.18)$$

где U_m , f_m , ϕ_m – амплитуда, частота и фаза m -той гармоники сигнала, соответственно; i – номер отсчета сигнала (дискретное время); ξ_i – значения аддитивного белого шума с математическим ожиданием $M_{\xi} = 0$ и дисперсией $\sigma_{\xi} = 0.1$ в моменты отсчетов; q – отношение сигнал/шум; N – количество зарегистрированных дискретных отсчетов (результатов измерений); Δt – шаг дискретизации, согласно теореме Котельникова определяемый соотношением:

$$\Delta t \leq n / (N \cdot f_{\max}), \quad (4.19)$$

где $f_{\max}$ – максимальная частота, n – число периодов сигнала за время измерения.

Для моделирования квантования уровня сигнала в процессе аналого-цифрового преобразования модель (4.18) была дополнена следующим образом [92]:

$$\tilde{u}_i = \frac{\text{round}\{2^d [u_i]\}}{2^d}, \quad (4.20)$$

где d – количество разрядов АЦП с двоичным шагом квантования; $\text{round}\{x\}$ – ближайшее целое числа x .

С помощью функции $\text{round}\{x\}$ учитываются шумы квантования АЦП при условии, что значение амплитуды U_0 измеряемого сигнала $u(t)$ не выходит за пределы рабочего диапазона АЦП. Модель (4.18) позволяет формировать сигнал любой сложности, в частности, при проведении исследования погрешности восстановления, была принята модель в виде суммы трех гармоник.

В результате исследований были получены оценки погрешности определения параметров колебательных компонент сигналов (амплитуд и частот) в зависимости от различных факторов (объем информации N отношение сигнал/шум q , число периодов n , разрядность АЦП d), а также определено

значение коэффициента сжатия для модифицированного метода Прони. В данном диапазоне коэффициент сжатия возрастает пропорционально увеличению числа отсчетов $K = N/12$, где знаменатель определяется произведением 3 извлеченных мод на 4 параметра моды, найденных по методу Прони.

Анализ результатов моделирования позволяет сделать выводы о том, что погрешность измерения амплитуды и частоты определяется единицами процентов. Для стабильных значений погрешностей измерения параметров колебательных компонент необходимо исследовать как минимум 300-400 отсчетов исследуемого сигнала. Увеличение числа отсчетов сигнала, отношения сигнал/шум, разрядности АЦП не приводят к снижению погрешности измерения амплитуд и частот колебательных компонент сигнала.

Модифицированный метод EMD+Прони можно применять для таких диагностических задач, как контроль трансформаторов в процессе их работы, в тех случаях, когда измерение сопротивлений, емкости и тангенса угла потерь производится на рабочей частоте. Он может применяться для контроля в электронных блоках и других работающих изделий, а также для получения амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик. При решении таких задач рабочая частота известна с определенной погрешностью, поэтому в работе необходимо использовать полный алгоритм обработки данных по методу Прони. Нужный гармонический сигнал выделяется по частоте, т.е. выбираются пара экспоненциальных членов, чья частота наиболее близка к рабочей. Если о сигнале имеется большее количество информации, то селекцию можно проводить по затуханию (например, выбирать только незатухающие гармонические составляющие), по амплитуде или начальной фазе принятого сигнала.

Проблемы при проведении спектрального оценивания возникают вследствие того, что сигнал может быть принят только на ограниченном как по времени, так и по частоте интервале наблюдений, кроме того, любое наблюдение предполагает наличие шума. Как следствие этого – неустойчивость

в оценке, которая определяется наличием нулей в оценках спектров, полученным по ограниченным наборам исходных данных. Один из способов устранения нулей – это всевозможные виды регуляризации. Однако регуляризация – всего лишь математический прием устранения следствий, а не причин. Причиной же появления нулей в спектре является использование предположения, что за пределами окна наблюдения сигнал обращается в ноль.

Это предположение может быть снято выбором вида аппроксимации, соответствующей исходным данным в пределах окна наблюдения и позволяющей продолжить сигнал за его пределы.

В отличие от других методов спектрального оценивания, в методе Прони за пределами интервала измерения поведение принятого сигнала, который можно воспроизвести по параметрам гармонических составляющих (их образуют комплексно-сопряженные экспоненты), ничем априорно не предопределяется.

Немаловажным является также тот факт, что время измерения не обязательно должно быть кратно периоду исследуемого сигнала. Такая проблема возникает при спектральном оценивании классическими методами. Метод цифрового спектрального оценивания Прони относится к параметрическим методам, поэтому оценка параметров гармонического колебания проводится с одинаковой точностью независимо от соотношения длительности интервала времени измерения и периода сигнала.

4.2 ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯТОРОВ ПОД РАБОЧИМ НАПРЯЖЕНИЕМ

Применение предлагаемого устройства в системах технического обслуживания по состоянию сдерживается необходимостью введения в существующее средство контроля электроизоляторов многофазной сети неравновесно – компенсационным методом [104] (рисунок 4.11) устройств коммутации SA1 и SA2 и дополнительных мер емкости и активного

сопротивления с комплексными сопротивлениями Z'_{03} и Z'_{02} для реализации базовой структуры на основе делителя напряжения с совокупными измерениями напряжения, как это показано для фазы С.

Повышение достоверности контроля электроизоляторов без изменения измерительной схемы, реализующей неравновесно – компенсационный метод, возможно за счет спектрального оценивания несинусоидальности рабочего напряжения путем применения метода спектрального оценивания Прони [60].

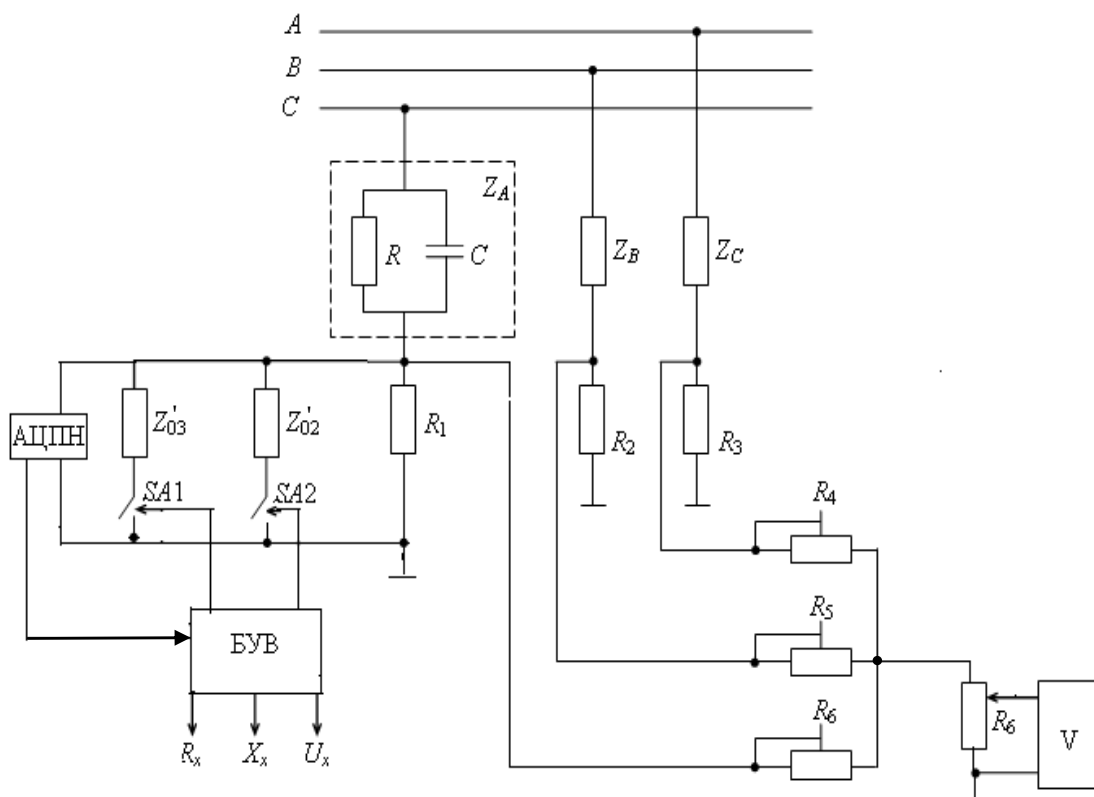


Рисунок 4.11 – Схема подключения устройства для измерения составляющих комплексного сопротивления изолятора и рабочего напряжения фазы А к средству контроля изоляторов трехфазной сети неравновесно – компенсационным методом

При использовании схемы замещения электроизолятора в виде последовательного соединения резистора сопротивлением R и конденсатора емкостью C комплексное сопротивление $\dot{Z}$ электроизолятора связано с его емкостью и активным сопротивлением уравнением

$$\dot{Z} = R + j / (\omega C) = R_X + j \cdot X_X. \quad (4.21)$$

Способ измерительного контроля электроизолятора под рабочим напряжением на основе спектрального анализа методом наименьших квадратов Прони состоит в следующем.

Измеряется амплитуда первой $U_S(\omega_1)$ и второй $U_S(\omega_2)$ гармоник рабочего напряжения и амплитуда первой $U_0(\omega_1)$ и второй $U_0(\omega_2)$ гармоник напряжения на опорном резисторе R_1 . Измерения может быть выполнено за счет использования высоковольтных устройств для измерения коэффициентов преобразования измерительных трансформаторов [93]. В частности, может быть эффективно использованы делители напряжения класса точности 0,1: емкостные делители напряжения ЕДН – 1 (рабочее напряжение до 15 кВ), ЕДН – 35 (рабочее напряжение до 35 кВ), ЕДН-2 (рабочее напряжение до 220 кВ) [105].

На следующем шаге выборка мгновенных значений напряжения на опорном резисторе подвергается процедуре Прони. В качестве модели сигнала была принята бигармоническая модель. Результатом применения процедуры являются амплитуда, частота, начальная фаза и затухание колебания.

Полученные в результате применения процедуры значения амплитуды первой и второй гармоник используются для определения коэффициента деления делителя, образованного объектом измерения (электроизолятором) и опорным резистором, на обеих частотах. Коэффициент деления напряжения первой гармоники $K(\omega_1)$ и коэффициент деления напряжения второй гармоники $K(\omega_2)$ определяются, соответственно, уравнениями

$$K(\omega_1) = \sqrt{\frac{R_1(R + R_1)^2 + (R_1 / (\omega_1 C))^2}{((R + R_1)^2 + (1 / \omega_1 C)^2)^2}} = \frac{U_S(\omega_1)}{U_0(\omega_1)}$$

и

$$K(\omega_2) = \sqrt{\frac{R_1(R + R_1)^2 + (R_1 / (\omega_2 C))^2}{((R + R_1)^2 + (1 / \omega_2 C)^2)^2}} = \frac{U_S(\omega_2)}{U_0(\omega_2)}. \quad (4.22)$$

Уравнения (4.22), решением системы которых реализуется описанный способ измерения параметров эквивалентной схемы замещения, представляют собой частную форму универсального уравнения измерения параметров комплексного сопротивления (2.1) при $\omega_1 \neq \omega_2$.

Система этих уравнений решается относительно R и C :

$$\begin{aligned}
 R &= R_X - R_1, \text{ где } R_X = \sqrt{x}, \quad x = -0.5n_4 - \sqrt{0.25n_4^2 + m_4q_4}, \\
 n_4 &= m_2(p_1 - n_1n_3) - n_2q_1 - p_2m_1 + n_1m_3q_2, \quad m_4 = m_1n_2 - n_1m_2m_3, \\
 q_4 &= q_2(p_1 - n_1n_3) - p_2q_1, \quad n_3 = \frac{m_2p_1 - m_1p_2}{m_2n_1}, \quad m_3 = \frac{m_1n_2}{m_2n_1}; \\
 n_2 &= b_2K^2(\omega_1) - b_1K^2(\omega_2), \quad m_2 = 2q_1(b_2a_1^2K(\omega_1) - b_1^2a_2^2K(\omega_2)), \\
 p_2 &= R_1^2(b_2 - b_1), \quad n_1 = K(\omega_1)K(\omega_2)(a_1^4 - a_2^4), \quad q_2 = R_0^2(b_2a_1^2 - b_1a_2^2), \quad b_2 = K(\omega_2)a_2^4, \\
 m_1 &= 2K(\omega_1)K(\omega_2)(a_1^2 - a_2^2), \quad q_1 = R_1^2(K(\omega_2)a_1^2 - K(\omega_1)a_2^2), \\
 p_1 &= R_1^2(K(\omega_2) - K(\omega_1)), \quad b_1 = K(\omega_1)a_1^4. \\
 C &= \frac{1}{\omega X_X}, \text{ где } X_X = \sqrt{y}, \\
 y &= -X + \frac{0.5R_1}{K(\omega_1)} - \sqrt{\left(X - \frac{0.5R_1}{K(\omega_1)}\right)^2 - X^2 + \frac{R_1X}{K(\omega_1)}}. \quad (4.23).
 \end{aligned}$$

Таким образом, применение метода Прони позволяет производить измерение активного сопротивления и емкости эквивалентной цепи при использовании пассивной измерительной цепи с одним состоянием.

4.3 ПОВЫШЕНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ КОМПЛЕКСНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ВЫСОКООМНЫХ ГЕТЕРОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Повышение качества эксплуатации высоковольтного энергетического оборудования может быть достигнуто за счет перехода от технического обслуживания по наработке к обслуживанию по состоянию [52].

Необходимость оценки состояния энергетического оборудования без вывода его из эксплуатации определяет, в частности, актуальность разработки и совершенствования метрологических характеристик средств измерений параметров комплексного сопротивления электроизоляционных конструкций под рабочим напряжением промышленной электрической сети с амплитудой более 1 кВ.

В области высоковольтных измерений наиболее широкими функциональными возможностями обладают измерения СКС с использованием измерительной схемы в виде делителя напряжения [6, 85], поскольку появляется возможность измерения под напряжением, превышающем предельно допустимые напряжения на мерах активного сопротивления и емкости. Однако при реализации этого метода измерения обязательной операцией является изменение значений емкости и электрического сопротивления, воспроизводимых многозначными мерами этих величин, путем коммутаций в группе однозначных мер.

Коммутации элементов высокоомной измерительной схемы являются причиной возникновения в ней длительных переходных процессов.. В связи с этим измерители ПКС высокоомных цепей характеризуются низким быстродействием. Время измерения может быть существенно уменьшено за счет экстраполяции информативного параметра измерительного сигнала от его мгновенных значений в начале переходного процесса на установившееся значение. При питании измерительной схемы рабочим напряжением, нормальная нестабильность которого составляет $\pm 5\%$, а допустимая – $\pm 10\%$ в соответствии с ГОСТ 13109–97 Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения., уменьшение времени измерения позволяет повысить точность измерения стандартизованных параметров высоковольтного электроизолятора.

Уменьшение времени измерения ПКС высокоомных электрических цепей путем определения установившегося значения амплитуды синусоидального напряжения на входе вольтметра переменного напряжения до окончания

переходного процесса в устройстве для измерения составляющих комплексного сопротивления на основе измерительной схемы с минимальным числом состояний может быть достигнута применением метода Прони [91].

Возможность применения метода Прони для уменьшения времени измерения параметров комплексного сопротивления высокоомных цепей была проверена экспериментально. Объектом измерения являлась двухполюсная электрическая цепь, образованная параллельным сопротивлением резистора с сопротивлением 2 МОм и конденсатора с емкостью 0,22 мкФ.

Целью эксперимента являлось определение методической погрешности вычисления установившегося значения амплитуды напряжения на опорном элементе по отсчетам первой половины переходного процесса методом Прони. Питание измерительной схемы в эксперименте осуществлялось от измерительного генератора АНР – 1105 гармоническим напряжением с амплитудой $20 \pm 0,2$ В и частотой $50 \pm 0,04$ Гц.

На рисунке 4.5 представлен график зависимости напряжения на входе АЦП от номера отсчета в процессе измерительного преобразования при частоте дискретизации 10 кГц. Переходной процесс вызван срабатыванием ключа в момент времени, соответствующий 410-му отсчету. Осциллограмма получена цифровым осциллографом TDS 1002B при коэффициенте усиления 10. Результат измерения установившегося значения амплитуды напряжения осциллографом – $17,27 \pm 0,15$ В.

Для определения установившегося значения амплитуды напряжения обработка отсчетов производилась в интервале с 410 по 810 отсчеты (окончанию переходного процесса соответствует отсчет 1210). Задавались следующие параметры математической модели: порядок $p = 6$, прореживание 20 (т.е. фактически обрабатывались не 400, а $400/20=20$ отсчетов). Прореживание необходимо, т.к. исходный шаг дискретизации 0,1 мс слишком мал для частоты 50 Гц. При реализации метода Прони шаг должен быть не

меньше, чем $1/(2\pi f)$, т.е. для частоты 50 Гц минимальный шаг дискретизации составляет 3,18 мс.

В результате обработки отсчетов первой половины переходного процесса методом Прони получены следующие значения параметров измерительного сигнала в установившемся режиме (установившееся значение амплитуды напряжения отмечено на рисунке 4.12 горизонтальной линией.): амплитуда – 16,48 В, частота – 49,72 Гц. Следовательно, при сокращении времени измерения в 2 раза методическая погрешность измерения частоты составила $\pm 0,6 \%$, амплитуды – $\pm 0,5 \%$. Данная методическая погрешность пренебрежимо мала по сравнению с инструментальной составляющей погрешности измерений параметров комплексного сопротивления, обусловленных нестабильностью рабочего напряжения ($\pm 5 \%$).

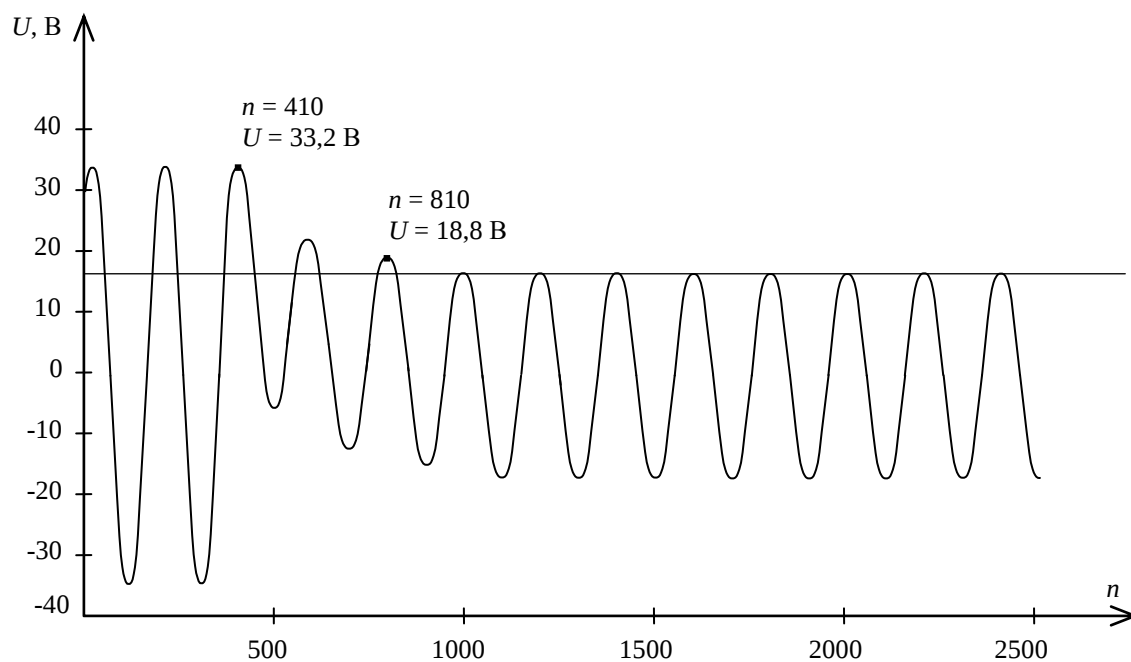


Рисунок 4.12 – График зависимости напряжения на входе АЦП напряжения от номера отсчета в процессе измерительного преобразования при частоте дискретизации 10 кГц

Таким образом, экспериментально доказано, что при измерении параметров комплексного сопротивления высокоомных устройствами с

коммутируемой измерительной схемой обработка отсчетов напряжения методом Прони позволяет не менее чем в два раза уменьшить время измерения без увеличения погрешности результата измерения.

4.4 РАЗРАБОТКА ВТОРИЧНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ДИЭЛЬКОМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

При измерении СКС гетерогенного объекта с использованием диэлькометрических датчиков на частотах свыше 100 кГц с промежуточным преобразованием в фазовый сдвиг необходима опорная частота 100 МГц и более. Это требует применения быстродействующих электронных компонентов, а следовательно, значительного увеличения потребляемой мощности и стоимости устройства. Предпочтительным в этом случае представляется измерение СКС с промежуточным преобразованием СКС в амплитуду синусоидального напряжения. Поскольку непосредственное аналого-цифровое преобразование высокочастотного сигнала требует быстродействующего АЦП, то обычно до аналого-цифрового преобразования производится преобразование переменного напряжения в постоянное напряжение.

Известны различные высокочастотные измерительные преобразователи параметров емкостных датчиков в напряжение постоянного тока с синусоидальным питанием измерительной схемы. Эти преобразователи обычно имеют в своем составе датчик, генератор синусоидального напряжения, диодно-резистивные измерительные схемы и фильтры низких частот. Общим недостатком этих преобразователей являются низкая чувствительность и недостаточная устойчивость к низкочастотным помехам нормального вида.

Более высокой чувствительностью обладает измерительные преобразователь по патенту США № 4142144, в котором ёмкостный датчик включен в эмиттерную цепь транзистора, база которого подключена к

генератору синусоидального напряжения. В процессе работы преобразователя емкость датчика заряжается током эмиттера открытого транзистора и разряжается током через цепь разряда, когда транзистор закрыт [106]. Среднее за период синусоидального напряжения значение коллекторного тока транзистора обратно пропорционально модулю комплексного сопротивления датчика.

Чувствительность и устойчивость данного измерительного преобразователя к низкочастотным помехам недостаточна при функционировании в рабочих режимах. Низкая чувствительность и отсутствие помехоустойчивости обусловлены тем, что ток протекает через датчик только в течение одного полупериода выходного напряжения генератора. С учетом наличия в коллекторном токе транзистора постоянной составляющей, обусловленной действием низкочастотной помехи, выражение для коллекторного тока имеет вид

$$I_K = I'_k \pm I_{II} = \frac{K}{z_X} + I_{II}, \quad (4.24),$$

где I'_k – составляющая тока коллектора транзистора, определяемая сопротивлением датчика, I_{II} – среднее значение составляющей тока коллектора, обусловленная низкочастотной помехой, K – коэффициент, зависящий от амплитуды, частоты и формы выходного напряжения генератора, z_X – модуль комплексного сопротивления датчика. Из уравнения (4.24) видно, что помеха вызывает изменение коллекторного тока, что является источником погрешности измерительного преобразования/

С целью повышения чувствительности и помехоустойчивости преобразования разработан измерительный преобразователь модуля комплексного сопротивления ёмкостного датчика в напряжение постоянного тока, структура которого представлена на рисунке 4.13 [107].

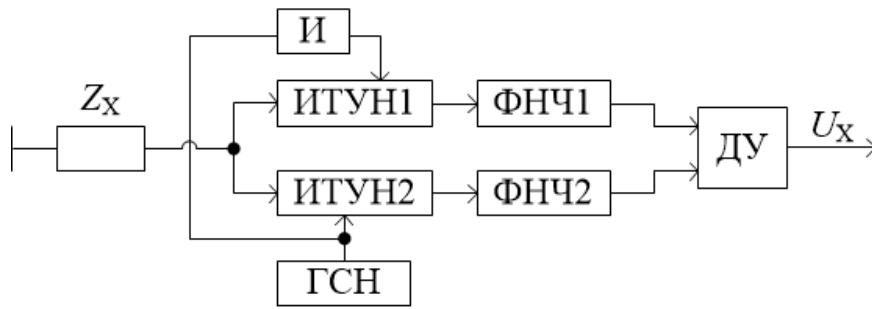


Рисунок 4.13 – Структура измерительного преобразователя
«модуль комплексного сопротивления- напряжение»

Измерительный преобразователь состоит из генератора синусоидального напряжения ГСН, инвертора И, управляемых напряжением источников тока ИТУН1 и ИТУН2, фильтров низких частот ФНЧ1 и ФНЧ2, дифференциального усилителя ДУ. Наличие в схеме двух ИТУН обеспечивает, в отличие от аналогов, синусоидальное напряжение на датчике и позволяет формировать выходное напряжение в течение обоих полупериодов синусоидального напряжения, чем достигается возможность измерения ПКС гетерогенных объектов и предельная для данного класса преобразователей чувствительность.

Функциональная схема измерительного преобразователя «модуль комплексного сопротивления – напряжение» представлена на рисунке 4.14.

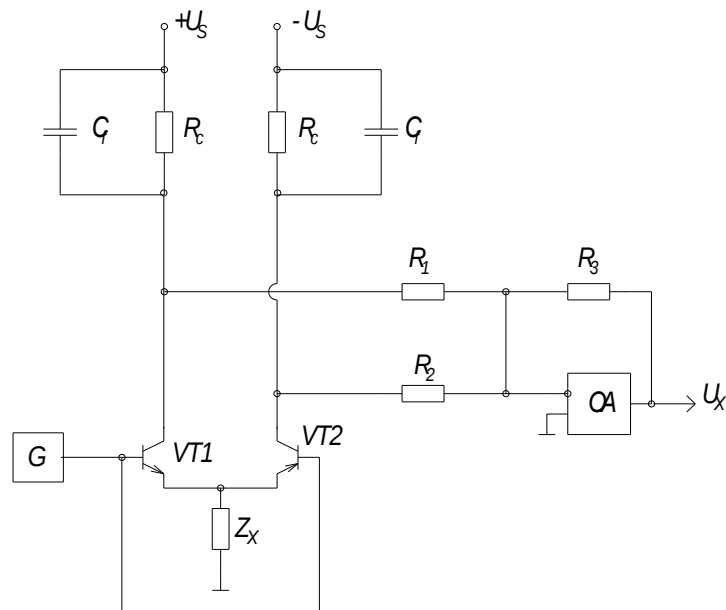


Рисунок 4.14 – Функциональная схема измерительного преобразователя «модуль комплексного сопротивления – напряжение»

Измерительный преобразователь модуля комплексного сопротивления в напряжение постоянного тока состоит из генератора синусоидального напряжения G , транзисторов разных типов проводимости $VT1$ и $VT2$, коллекторных резисторов R_f , фильтрующих конденсаторов C_f и сумматора на основе операционного усилителя OA и резисторов $R_1 - R_3$, выход которого является выходом измерительного преобразователя. При реализации сумматора необходимо обеспечить равенство сопротивлений резисторов R_1 и R_2 .

Измерительное преобразование модуля z_X комплексного сопротивления $\dot{Z}_X$ в напряжение постоянного тока U_X осуществляется следующим образом. Переменное напряжение, поступающее с генератора G на базы транзисторов $VT1$ и $VT2$, поочередно вводит их в открытое и закрытое состояния. В течение полупериода положительной полярности в открытом состоянии находится транзистор $VT1$, а в течение полупериода отрицательной полярности – транзистор $VT2$.

Средние за период синусоидального напряжения значения коллекторных токов I_{K1} и I_{K2} транзисторов $VT1$ и $VT2$ определяются значением модуля комплексного сопротивления датчика. Действие низкочастотной помехи (например, с частотой промышленной сети) вызывает появление в коллекторных токах обоих транзисторов постоянных составляющих I_{Π} . Это объясняется тем, что частота переменного напряжения генератора G в $\cdot 10^3 - \cdot 10^6$ раз больше частоты сетевой помехи, и ток помехи не успевает заметно измениться в течение периода напряжения на выходе генератора G .

Токи $I_{K1} = I'_{K1} \pm I_{\Pi}$ и $I_{K2} = I'_{K2} \pm I_{\Pi}$ создают напряжения на коллекторных резисторах и конденсаторах. Дальнейшее преобразование коллекторных напряжений осуществляется сумматором. При этом напряжение на выходе устройства описывается выражением

$$U_X = [(I'_{K1} \pm I_{\Pi}) - (-I'_{K2} \pm I_{\Pi})] R_K A, \quad (4.25)$$

где A - коэффициент передачи сумматора, $A = R_3/R_1 = R_3/R_2$.

Если за период выходного напряжения генератора G модуль комплексного сопротивления Z_X не изменяется, то $I'_{k1} = I'_{k2} = I$, и выражение (2.25) приобретает вид

$$U_X = 2I R A = \frac{2k}{z_X}, \quad (4.26)$$

т.е. выходное напряжение измерительного преобразователя не зависит от амплитуды помехи.

Для определения отклонения ПКС гетерогенного объекта от ПКС объекта, принятого за основу для сравнения, целесообразно использовать дифференциальный диэлькометрический датчик. Разработан способ помехоустойчивого высокочувствительного преобразования модуля комплексного сопротивления диэлькометрического датчика в напряжение постоянного тока [108]. Способ преобразования состоит в периодическом перезаряде от источника синусоидального напряжения первого и второго конденсаторов дифференциального датчика. В процессе преобразования выделяют токи перезаряда конденсаторов одного направления и токи перезаряда конденсаторов другого направления. Затем формируют первый и второй промежуточные сигналы, пропорциональные разности токов перезаряда соответственно первого и второго конденсаторов. Заключительный этап преобразования состоит в формировании выходного сигнала, пропорционального разности промежуточных сигналов.

Функциональная схема измерительного преобразователя «разность модулей комплексного сопротивления – напряжение» представлена на рисунке 4.15.

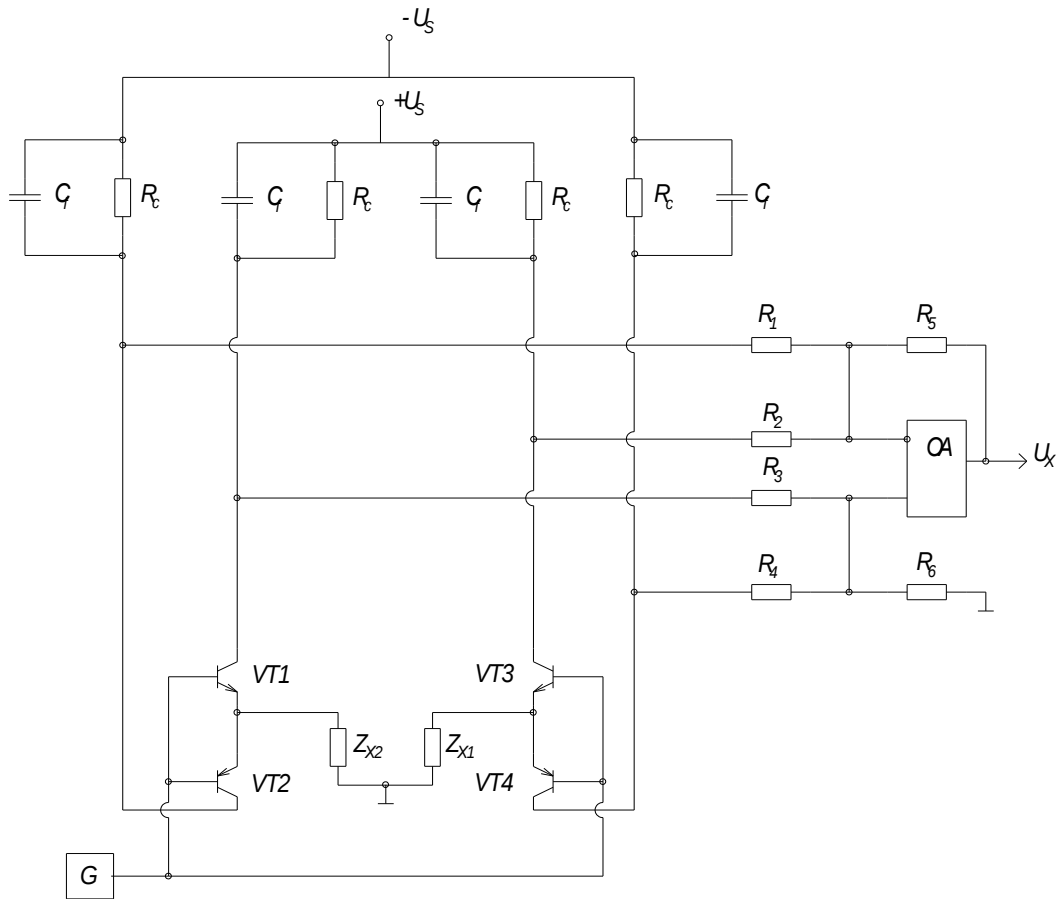


Рисунок 4.15 – Функциональная схема измерительного преобразователя
«разность модулей комплексного сопротивления – напряжение»

Устройство содержит два транзистора одного типа проводимости $VT1$, $VT2$ и два транзистора другого типа проводимости $VT3$ и $VT4$, генератор гармонического напряжения G , четыре одинаковых коллекторных резистора R_f , четыре одинаковых фильтрующих конденсатора C_f и сумматор на основе операционного усилителя OA и шести одинаковых резисторов $R1 - R6$. Выход сумматора является выходом устройства.

При положительной полуволне синусоидального напряжения с выхода генератора G открыты $n-p$ транзисторы $VT1$ и $VT3$, а $p-n-p$ транзисторы $VT2$ и $VT4$ закрыты. Эмиттерными токами транзисторов $VT1$ и $VT3$ обеспечивается одновременный перезаряд первого и второго конденсаторов дифференциального датчика токами одного направления. Коллекторные токи транзисторов $VT1$ и $VT3$, пропорциональные модулям комплексного

сопротивления плеч датчика, создают падения напряжения на их коллекторных резисторах и заряжают фильтрующие конденсаторы до этих напряжений.

В течение отрицательной полуволны выходного напряжения генератора G транзисторы $VT1$ и $VT3$ закрываются, транзисторы $VT2$ и $VT4$ открываются, и конденсаторы дифференциального датчика перезаряжаются токами другого направления. При этом средние (за период выходного напряжения генератора G) значения коллекторных токов транзисторов $VT2$ и $VT4$ также создают падения напряжения, пропорциональные модулям комплексных сопротивлений соответствующих конденсаторов датчика, на своих коллекторных резисторах. Фильтрующие конденсаторы заряжаются до напряжения на соответствующих коллекторных резисторах.

Коллекторные напряжения всех транзисторов поступают на соответствующие входы сумматора. При этом коллекторные напряжения транзисторов $VT1$ и $VT3$ имеют положительную полярность, а коллекторные напряжения транзисторов $VT2$ и $VT4$ – отрицательную полярность. Эти напряжения суммируются сумматором. Если в течение периода гармонического напряжения $Z_{X1} = const$ и $Z_{X2} = const$, напряжение на выходе ИП описывается выражением:

$$\begin{aligned} V_X &= \{[(I_{k1} \pm I'_{II}) - (I_{k11} \pm I'_{II})] - [(I_{k2} \pm I''_{II}) - (I_{k12} \pm I''_{II})]\} R_f A \\ &= [(I_{k1} + I_{k11}) - (I_{k2} + I_{k12})] \cdot R_f \cdot A = \\ &= 2(I_{CX1} - I_{CX2}) R_f A = 2k \left(\frac{1}{Z_{X1}} - \frac{1}{Z_{X2}} \right). \end{aligned} \quad (4.27)$$

Разработанный способ преобразования модуля комплексного сопротивления в напряжение и реализующие его измерительные преобразователи обеспечивают вдвое большую чувствительность измерительного преобразователя по сравнению с другими преобразователями этого типа и устойчивость к низкочастотным помехам нормального вида. Важным достоинством этого технического решения при измерении ПКС

является формирование синусоидального напряжения на диэлькометрическом датчике в процессе преобразования.

Разработанный измерительный преобразователь нашел применение в приборе для измерения влагосодержания мазута [108]. Высокая чувствительность измерительного преобразователя позволяет использовать сравнительно малогабаритные погружные и наливные диэлькометрические датчики с собственной емкостью 30 – 50 пФ и менее. Рабочая частота измерительного преобразования – от 1 до 5 МГц. Основная погрешность преобразования не превышает $\pm 0.1\%$.

Перспективно применение данного измерительного преобразователя при решении широкого круга измерительных задач на основе измерения ПКС сыпучих, жидких и газообразных гетерогенных объектов: измерение долевого содержания компонентов в газожидкостных смесях [109], степени загрязнения смазочных масел [110], степени деградации электроизоляционных свойств трансформаторных и конденсаторных масел, амбулаторного мониторинга дыхания [66, 67].

4.5 РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ГЕТЕРОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ В РАБОЧИХ РЕЖИМАХ

Температура является одной из физических величин, определяющих рабочий режим гетерогенного объекта, и существенно влияет на его функциональные параметры. Результаты измерений температуры используются для расчета значений функциональных параметров гетерогенного объекта на основе принятой математической модели связи СКС и функциональных параметрах объекта в составе комбинированной модели.

К датчикам температуры, используемым при измерении СКС гетерогенных объектов в режиме мониторинга в процессе эксплуатации предъявляются следующие основные требования:

- конструктивная совместимость с объектом измерения, в частности, возможность измерять температуру поверхности объекта сложной формы;
- высокая временная стабильность характеристики преобразования;
- наличие цифровых приборов для измерения температуры, способных функционировать с датчиками температуры разных типов;
- минимальные габариты и масса устройства для измерения температура.

Термопреобразователи сопротивления обладают большей временной стабильностью по сравнению с термисторами и термоэлектрическими преобразователями. Фольговые и тонкопленочные термопреобразователи сопротивления изготавливаются с относительно большой площадью чувствительного элемента, что при малой массе обеспечивает быстрое изменение температуры датчика от начальной до измеряемой. В связи с этим термопреобразователи сопротивления наиболее пригодны для измерений температуры гетерогенных объектов в рабочих режимах.

В настоящее время широко используются медные, никелевые, платиновые термопреобразователи сопротивления, перспективно использование в качестве материала для изготовления чувствительного элемента золота и иридия. Датчики температуры изготавливаются из этих металлов по тонкопленочной и фольговой технологии и характеризуются высокой стабильностью, взаимозаменяемостью, быстродействием на уровне единиц секунд.

Возможности применения этих датчиков ограничиваются относительно малым номинальным сопротивлением (10–100 Ом), низкой чувствительностью (не более 6×10^{-3} 1/К), малой допустимой рассеиваемой мощностью (менее 0,5 мВт). Серьезной проблемой при разработке универсального вторичного измерительного преобразователя для термопреобразователей сопротивления является различная форма номинальных статических характеристик датчиков с чувствительными элементами из разных металлов. При аппроксимации функция преобразования степенными полиномами никель, золото, иридий

имеют положительный квадратичный член, платина – отрицательный, медь – нулевой.

Линеаризация характеристики преобразования датчика температуры может осуществляться на различных этапах измерительного преобразования: непосредственно в чувствительном элементе датчика при преобразовании при преобразовании сопротивления в активную величину (напряжение, ток) [111], в процессе аналого-цифрового преобразования [112, 113] и путем цифровой коррекции выходного сигнала линейного АЦП напряжения с использованием постоянных запоминающих устройств [114]. В настоящее время, несмотря на широкое использование микропроцессоров в измерительной технике, продолжают развиваться все направления. Оптимальный вариант технической реализации определяется условиями конкретной измерительной задачи, технологическими возможностями и экономическими показателями разработки.

Характеристика преобразования термопреобразователя сопротивления в рабочем диапазоне температуры описывается уравнением

$$R_{\Theta} = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Theta + \beta \cdot \Theta^2), \quad (4.28)$$

где R_{Θ} – электрическое сопротивление датчика температуры при измеряемой температуре, R_0 – электрическое сопротивление датчика температуры при температуре 0 °С, α, β – известные постоянные коэффициенты.

При включении датчика в цепь источника постоянного тока на нем формируется напряжение

$$U_{\Theta} = I_0 \cdot R_{\Theta} = K_I \cdot U_0 \cdot R_{\Theta}, \quad (4.29)$$

где I_0 – ток через датчик; K_I – коэффициент преобразования опорного напряжения U_0 в ток.

При использовании в составе цифрового термометра интегрирующего преобразователя напряжения в интервал времени задачей линеаризации является формирование интервала времени, длительность которого линейно зависит от температуры. Структура АЦП температуры с аналоговой

линеаризацией характеристики преобразования, представлена на рисунке 4.16 [115].

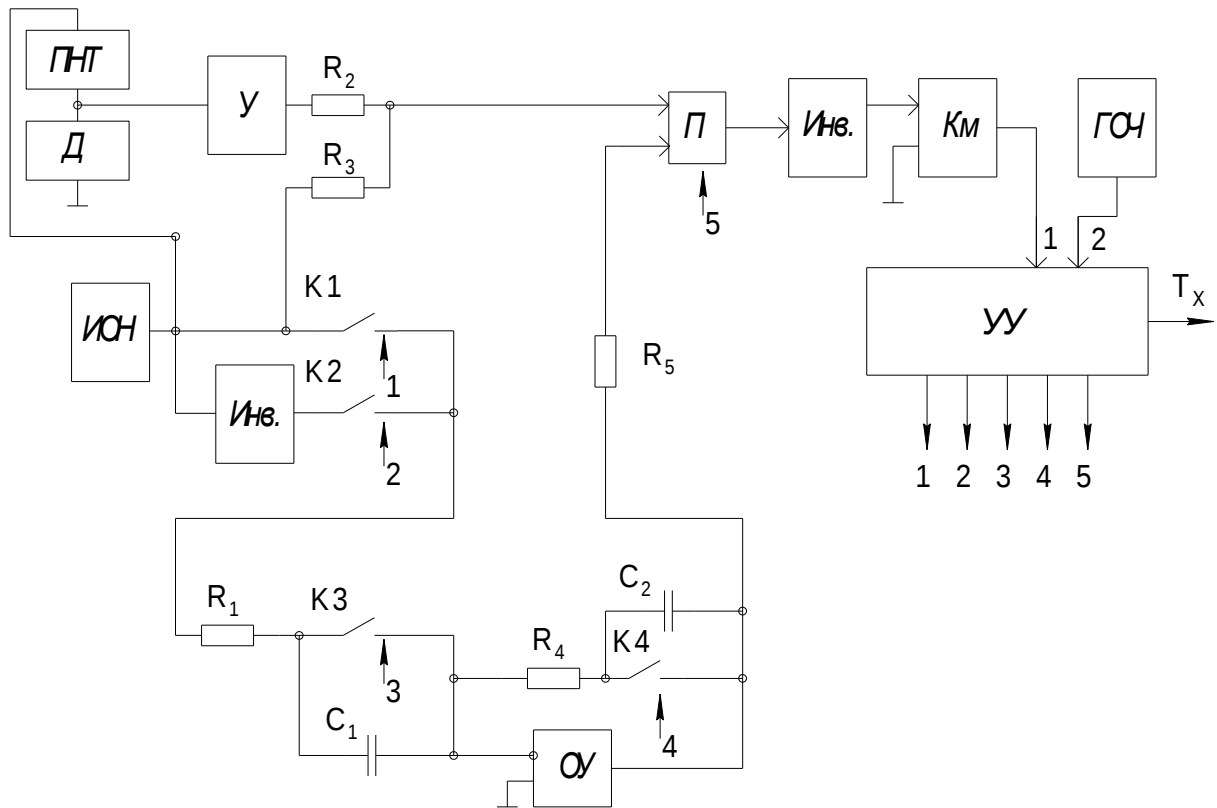


Рисунок 4.16 – Структура нелинейного АЦП температуры с аналоговой линеаризацией характеристики преобразования

Измерительное преобразование основано на двухтактном интегрирующем преобразовании. В момент начала цикла преобразования ключи $K1$ и $K2$ разомкнуты, ключи $K3$ и $K4$ замкнуты, напряжение на выходе интегратора $Инт.$ равно нулю, переключатель Π по сигналу с выхода 5 устройства управления $УУ$ подключает выход усилителя $У$ к входу интегратора $Инт.$.

В первом такте преобразования в течение опорного интервала времени $T_{0П}$ интегратором суммируются и интегрируются напряжение U_0 , усиленное усилителем $У$, и опорное напряжение U_0 с выхода источника опорного напряжения, полярность которого противоположна полярности напряжения на

датчике. Отношение постоянных времени интегрирования равно отношению сопротивлений резисторов R_2 и R_4 .

Опорный интервал времени формируется путем подсчета определенного числа импульсов образцовой частоты с периодом следования, формируемых генератором опорной частоты.

$$T_{ОП} = N_0 \cdot T_0. \quad (4.30)$$

К моменту окончания опорного интервала времени $T_{ОП}$ на выходе интегратора формируется напряжение

$$U_{И}(T_{ОП}) = - \int_0^{T_{ОП}} \left[\frac{I_0 \cdot R_T \cdot K}{R_2 \cdot C_{И}} - \frac{U_0}{R_3 \cdot C_{И}} \right] \cdot dt = - \frac{K \cdot I_0 \cdot R_T \cdot T_{ОП}}{R_2 \cdot C_{И}} + \frac{U_0 \cdot T_{ОП}}{R_3 \cdot C_{И}}, \quad (4.31)$$

где k – коэффициент усиления усилителя U , R_2 , R_3 – сопротивления соответствующих резисторов, C_2 – емкость конденсатора интегратора.

Значения параметров I_0 , K , R_2 , U_0 , R_3 выбираются таким образом, чтобы выполнялось равенство

$$\frac{I_0 \cdot K \cdot \alpha}{R_2} = \frac{U_0}{R_3}. \quad (4.32)$$

Полярность напряжения $U_{И}(T_{ОП})$ совпадает с полярностью напряжения U_T при $\Theta > 0$ и противоположна ей при $\Theta < 0$.

Состояние выхода компаратора $K_{М}$ определяется полярностью выходного напряжения генератора, и, следовательно, в момент окончания опорного интервала времени $T_{ОП}$, знаком измеряемой температуры. Состояние выхода компаратора $K_{М}$ в момент окончания опорного интервала времени $T_{ОП}$ фиксируется устройством управления $УУ$. В зависимости от зафиксированного значения устройство управления формирует во втором такте различные сигналы управления ключами, обеспечивая при любой полярности температуры формирование информативного интервала времени, длительность которого линейно зависит от температуры.

В момент окончания опорного интервала времени независимо от знака измеряемой температуры переключатель Π подключает к входу интегратора через резистор R_5 выход операционного усилителя ОУ, и на выходе устройства управления начинается формирование информативного интервала времени T_X .

При $\Theta > 0$ в момент окончания опорного интервала времени на выходе компаратора присутствует низкий логический уровень. При низком логическом уровне на входе 1 в момент окончания опорного интервала времени устройство управления УУ формирует на выходах 2 и 4 сигналы, по которым замыкается ключ $K2$ и размыкается ключ $K4$.

На выходе ОУ формируется напряжение

$$U_{OY}(t) = -U_0 \cdot \left(\frac{R_4}{R_1} + \frac{t}{R_1 \cdot C_2} \right), \quad (4.33)$$

где R_4 – сопротивление резистора R_4 , R_1 – сопротивление резистора R_1 .

Напряжение U_{OY} интегрируется через резистор R_5 интегратором до момента равенства нулю его выходного напряжения, что фиксируется компаратором $Kм$ путем формирования на выходе высокого логического уровня. Этому моменту соответствует равенство

$$\frac{K \cdot I_0 \cdot T_{OП} \cdot \Theta}{R_3} \cdot (b + c \cdot \Theta) = \frac{U_0 \cdot T_X}{R_1 \cdot R_5} \cdot \left(R_4 + \frac{T_X}{2 \cdot C_2} \right). \quad (4.34)$$

Появления на выходе компаратора $Kм$ высокого логического уровня является моментом окончания информативного интервала времени T_X .

При выборе значений параметров уравнения (4.34) таким образом, чтобы выполнялись равенства

$$\frac{K \cdot I_0 \cdot T_{OП} \cdot b}{R_3} = \frac{U_0 \cdot R_4}{R_1 \cdot R_5} \quad (4.35)$$

и

$$\frac{K \cdot I_0 \cdot T_{OП} \cdot c}{R_3} = \frac{U_0}{2 \cdot R_1 \cdot R_5 \cdot C_2}, \quad (4.36)$$

длительность информативного интервала времени линейно зависит от температуры при $\Theta > 0$.

При измерении $\Theta < 0$ в момент окончания опорного интервала времени на выходе компаратора K_m присутствует высокий логический уровень. При этом устройство управления $УУ$ фиксирует отрицательный знак измеряемой температуры и формирует на управляющих выходах 1 и 3 сигналы, по которым замыкается ключ K_1 и размыкается ключ K_3 .

На выходе $ОУ$ формируется напряжение

$$U_{OY} = U_0 \cdot \frac{R_4}{R_1} \cdot e^{-\frac{t}{R_1 \cdot C_1}} \approx \frac{U_0 \cdot R_4}{R_1} \cdot \left(1 - \frac{t}{R_1 \cdot C_1}\right). \quad (4.37)$$

Это напряжение интегрируется интегратором через резистор R_5 . При этом выходное напряжение интегратора уменьшается до нуля. Этому моменту соответствует равенство

$$\frac{K \cdot I_0 \cdot T_{OP} \cdot \Theta}{R_3} \cdot (b - c \cdot \Theta) = \frac{U_0 \cdot R_4 \cdot \Theta_X}{R_1 \cdot R_5} \cdot \left(1 - \frac{T_X}{2 \cdot R_1 \cdot C_2}\right). \quad (4.38)$$

При выборе значений параметров этого уравнения таким образом, чтобы выполнялись равенства

$$\frac{K I_0 T_{OP}}{R_3} = \frac{U_0 R_4}{R_1 R_5} \quad (4.39)$$

и

$$\frac{K I_0 T_{OP} c}{R_3} = \frac{U_0 R_4}{2 R_1^2 R_5 C_1}. \quad (4.40)$$

В этом случае информативный интервал времени линейно зависит от температуры при $\Theta < 0$.

Таким образом, описанное устройство позволяет осуществлять измерение как положительной, так и отрицательной температур посредством резистивных датчиков температуры с нелинейной передаточной характеристикой, имеющей положительный квадратичный член.

Данный измерительный преобразователь при минимальных изменениях в схеме может быть использован для работы с датчиками температуры, передаточная характеристика которых имеет отрицательный квадратичный член, в частности, платиновыми. Для этого достаточно подавать на вход 1 устройства управления инверсное значение выходного сигнала компаратора. В этом случае узел на основе *ОУ* работает в режиме дифференцирования при измерении $\Theta > 0$ и в режиме интегратора при измерении $\Theta < 0$.

На основе описанного измерительного преобразователя разработан цифровой термометр на базе стандартизованных резистивных медных, платиновых и никелевых датчиков температуры [116]. Прибор имеет следующие технические характеристики:

- время измерения – 1 с;
- измерительный ток – не более 0.6 мА;
- потребляемый ток (напряжение питания 9В) – 8мА;
- габаритные размеры-115 × 70 × 45 мм;
- масса (без источника питания) – 0.21 кг.

Диапазон измерения температуры и точность измерения практически полностью определяются соответствующими характеристиками применяемого датчика. Экспериментально доказано, что, например, для стандартизованной передаточной характеристики никелевого датчика температуры в диапазоне от – 60 °С до + 180 °С может быть достигнута абсолютная погрешность нелинейности не более $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ при нелинейности характеристики до $\pm 7^{\circ}\text{C}$.

Высокая стабильность функции преобразования обеспечивается при хранении корректирующих поправок в цифровой форме в постоянных запоминающих устройствах. Для формирования нелинейной составляющей опорного напряжения применяется цифро-аналоговый преобразователь.

Структура АЦП, реализующего такой способ линеаризации, приведена на рисунке 4.17 [117]. Формирование требуемой функциональной зависимости длительности информативного интервала времени от напряжения, обратной функции преобразования, т.е. зависимости этого напряжения от измеряемой

величины, осуществляется в процессе двухтактного интегрирующего преобразования. Код результата формируется путем подсчета импульсов опорной частоты в течение информативного интервала времени.

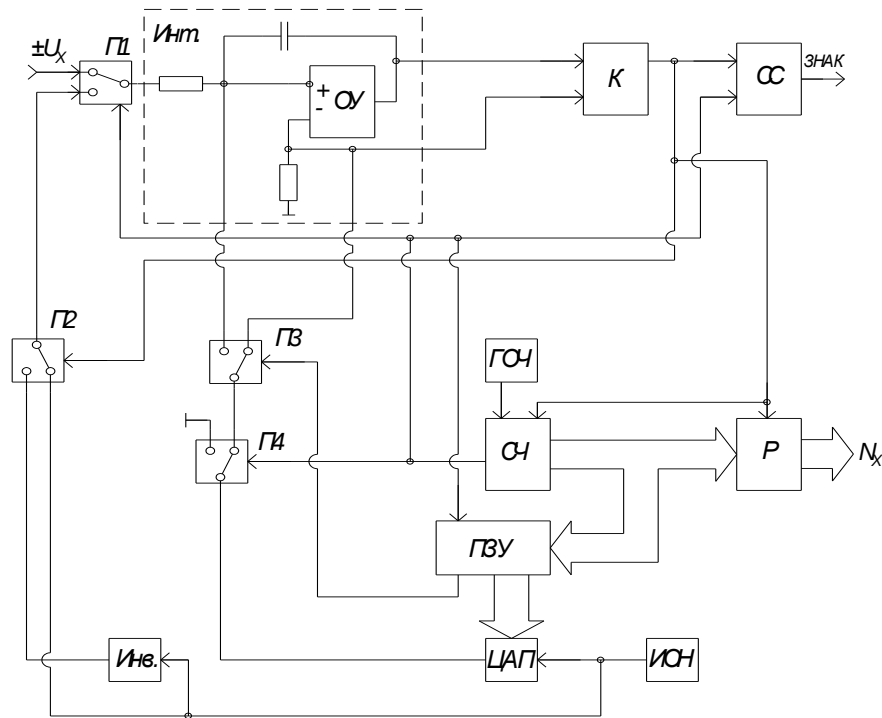


Рисунок 4.17 – Структура функционального АЦП напряжения

В первом такте преобразования в течение фиксированного опорного интервала времени $T_{оп}$ входное напряжение интегрируется интегратором *Инт.* Во втором такте преобразования к входу интегратора *Инт.* подключается опорное напряжение с полярностью, противоположной полярности выходного напряжения усилителя. Входное напряжение интегратора *Инт.* начинает уменьшаться. При этом на линейную зависимость напряжения от времени на выходе интегратора *Инт.* накладывается требуемая нелинейная зависимость, определяемая ступенчатой функцией, значения которой записаны в *ПЗУ*.

Адресное слово *ПЗУ* формируется текущим состоянием счетчика *Сч* и состоянием знакового выхода АЦП «ЗНАК». Значения слов с выхода *ПЗУ* преобразуются в напряжение посредством ЦАП. Формирование требуемой нелинейной зависимости осуществляется подачей корректирующего тока в

суммирующую точку интегратора *Инт.* или корректирующего напряжения на неинвертирующий вход операционного усилителя интегратора *Инт.*. Соответственно, скорость уменьшения выходного напряжения интегратора увеличивается или уменьшается, чем обеспечивается либо спад, либо подъем передаточной характеристики преобразователя.

Коды управления ЦАП в течение второго такта преобразования на каждом интервале времени с длительностью, равной периоду тактовой частоты T_0 , определяются из выражения

$$N(n) = \frac{T_{OP} \cdot \tau_2 \cdot \Delta U_X}{U_0 \cdot \tau_1 \cdot \Delta T_X} \cdot N_{\max} - \sum_{n=1}^{n-1} N(n)), \quad (4.41)$$

где $N(n)$ – значение кода, записываемое по n -му адресу ($n=0, 1, 2, \dots$), ΔU_X – нелинейная составляющая зависимости преобразуемого напряжения U_X от измеряемой величины, τ_1 и τ_2 – постоянные времени интегрирования интегратора по инвертирующему и неинвертирующему входам соответственно, U_0 – опорное напряжение АЦП, ΔT_X – приращение длительности информативного интервала времени, обусловленное нелинейной составляющей ΔU_X преобразуемого напряжения, $N_{\max}$ – максимальное значение кода коррекции.

Повышение точности преобразования достигнуто путем исключения ряда составляющих инструментальной погрешности преобразования. Благодаря высокой точности преобразования и возможности заносить в ПЗУ любую последовательность кодов, преобразователь может применяться для коррекции передаточных характеристик не только датчиков температуры, но и нелинейных датчиков других физических величин.

При производстве изделий электронной техники необходимость измерения температуры возникает при выполнении ряда производственных операций: отжиг, закалка, обезгаживание, пайка и др. Точность соблюдения температурных режимов в процессе выполнения этих операций в значительной степени определяет качество продукции.

При производстве продукции в сфере государственного метрологического надзора допускается применение термоэлектрических преобразователей и термопреобразователей сопротивления только со стандартизованными номинальными статическими характеристиками.

Введение в состав измерительных приборов микропроцессора позволяет эффективно решать широкий круг измерительных задач, в том числе задачу линеаризации характеристик датчиков физических величин. Для измерительного контроля качества выполнения термических операций обезгаживания в процессе производства вакуумных изделий электронной техники в АО «НИИЭМП»

г. Пенза разработан микропроцессорный измеритель-регулятор температуры с энергонезависимой памятью объемом 2 кб. Устройство обеспечивает измерение температуры в диапазоне от 0 до 1200 °С с основной погрешностью практически равной погрешности первичного преобразователя (термопары типа ХА и ХК, ПП, ВР и терморезистор типа 100П). Имеется возможность цифрового ввода заданного значения температуры с дискретностью 1 °С. Регулирование температурой осуществляется по релейному закону с гистерезисом 1 °С. Текущее значение температуры сохраняется во внутреннюю память 1 раз в минуту.

С внедрением в измерительную технику микропроцессорных средств измерения (в частности, микропроцессорных термометров) появилась возможность проводить цифровую линеаризацию. В зависимости от требований точности она может быть табличная, линейная, полиномиальная, кусочно-линейная, кусочно-полиномиальная и т.д. Наибольшую точность позволяет получить табличный метод линеаризации, при котором таблица соответствия хранится в памяти программ микропроцессора. Однако этот метод имеет и ряд недостатков: большой шаг таблицы и большой объем памяти. Таблицы в стандарте приведены с дискретностью 1°С, и для получения

промежуточных значений температуры необходимо дополнительно использовать интерполирующие формулы пересчета. Стандартизованные номинальные статические характеристики термоэлектрических преобразователей описываются полиномами 8–11-й степени. Их использование в микропроцессорных термометрах связано со сложностью расчетов, что, в свою очередь, требует большого объема свободной оперативной памяти и значительных временных затрат.

Для сокращения объема требуемой памяти при заданной точности была разработана кусочно-полиномиальная аппроксимация номинальных статических характеристик преобразователей. Отклонение номинальной статической характеристики от линейной зависимости было аппроксимировано полиномом второго или третьего порядка.

В таблицах 4.1–4.3 приведены диапазоны разбиения и соответствующие им полиномы для термоэлектрических преобразователей типа хромель-алюмель (ХА) и хромель-копель (ХК) (таблица 4.1), вольфрам-рений (ВР-2) и платина-платина/родий (ПП(S)) (таблица 4.2) и термопреобразователя сопротивления типа 100П (таблица 4.3).

Неисключённая абсолютная погрешность нелинейности первичных преобразователей различна на различных участках номинальных статических характеристик, но не превышает следующих оценок: ХА — $\pm 0,20^{\circ}\text{C}$, ХК — $\pm 0,25^{\circ}\text{C}$, ВР-2 — $\pm 0,60^{\circ}\text{C}$, ПП (S) — $\pm 0,75^{\circ}\text{C}$, 100П — $\pm 0,13^{\circ}\text{C}$.

При более высоких требованиях к точности измерения температуры погрешность можно снизить за счет числа участков аппроксимации.

Таблица 4.1 – Полиномы для термоэлектрических преобразователей типа хромель-алюмель (ХА) и хромель-копель (ХК)

Термопара ХА		Термопара ХК	
Диапазон, °C	Полином	Диапазон, °C	Полином
0 ÷ 84	$0,0003 \cdot x^2 - 0,035 \cdot x - 0,074$	0 ÷ 84	$0,000931 \cdot x^2 - 0,238 \cdot x - 0,1329$
85 ÷ 159	$-0,00027 \cdot x^2 + 0,057 \cdot x - 3,74$	85 ÷ 177	$0,000633 \cdot x^2 - 0,2186 \cdot x - 0,2508$
160 ÷ 381	$0,000163 \cdot x^2 -$ $-0,0945 \cdot x + 9,4$	178 ÷ 379	$0,000183 \cdot x^2 -$ $-0,0573 \cdot x - 14,5579$
382 ÷ 649	$0,0000081 \cdot x^2 +$ $+0,0215 \cdot x - 12,6$	380 ÷ 649	$0,000012 \cdot x^2 +$ $+0,0731 \cdot x - 39,5412$
650 ÷ 898	$-0,000117 \cdot x^2 +$ $+0,1815 \cdot x - 63,982$	650 ÷ 800	$-0,000039 \cdot x^2 +$ $+0,123 \cdot x - 50,5857$
899 ÷ 1200	$-0,0001676 \cdot x^2 +$ $+0,2747 \cdot x - 107,03$	1201 ÷ 1300	$-0,0003015 \cdot x^2 +$ $+0,5838 \cdot x - 258,57$

Таблица 4.2 – Полиномы для термоэлектрических преобразователей типа вольфрам-рений (ВР-2) и платина-платина/родий (ПП(S))

Термопара ВР-2		Термопара ПП (S)	
Диапазон, °C	Полином	Диапазон, °C	Полином
0 ÷ 164	$0,001 \cdot x^2 - 0,293 \cdot x - 0,198$	0 ÷ 165	$-0,000012 \cdot x^3 + 0,0043 \cdot x^2 -$ $-0,72 \cdot x - 0,27$
165 ÷ 497	$0,000083 \cdot x^2 +$ $+0,014 \cdot x - 22,322$	166 ÷ 435	$0,000336 \cdot x^2 -$ $-0,2187 \cdot x - 24,41$
498 ÷ 854	$-0,00005 \cdot x^2 +$ $+0,1014 \cdot x - 47,506$	436 ÷ 1000	$0,000128 \cdot x^2 -$ $-0,0788 \cdot x - 48,4388$
855 ÷ 1000	$-0,000162 \cdot x^2 +$ $+0,287 \cdot x - 124,7$	1001 ÷ 1100	$0,000089 \cdot x^2 -$ $-0,00971 \cdot x - 79,6975$
1001 ÷ 1200	$-0,0001885 \cdot x^2 +$ $+0,34 \cdot x - 151,81$		

Таблица 4.3 – Полином термопреобразователя сопротивления 100П

Термопреобразователь сопротивления 100П	
Диапазон, °С	Полином
-70 ÷ 200	$-0,000153 \cdot x^2 + 0,03054 \cdot x - 0,0072$

Операция «обезгаживание» при производстве вакуумных изделий электронной техники до 10 часов с жёстким циклом. Результаты измерения температуры не используются для автоматического управления ходом операции, необходима только их регистрация для документирования правильности проведения операции, поэтому функционирование системы в режиме мониторинга. Метрологическое обеспечение таких операций целесообразно осуществлять с использованием ИИС с асинхронным сбором данных. Измерительная информация о ходе производственной операции передается на компьютер после завершения цикла процесса. В связи с этим большие перспективы имеют современные технологии беспроводной связи, в частности, технология высокопроизводительной коротковолновой связи Bluetooth. Но внедрение этих технологий в существующее технологическое оборудование сопряжено с серьезными трудностями, вызванными высоким уровнем помех в производственных цехах.

Разработана структура ИИС с асинхронной передачей измерительной информации с использованием энергонезависимой памяти, структура которой представлена на рисунке 4.18 [118].

В общем случае в состав такой системы входят: неограниченное число средств измерений, один или несколько электронных регистраторов измерительной информации с энергонезависимой памятью (EEPROM), блок сопряжения регистратора с компьютером и персональный компьютер пользователя РС. Каждое средство измерений имеет необходимый объем памяти данных, встроенные часы-календарь и разъем для подключения

регистратора. Блок сопряжения, который преобразует формат I2C в стандарт кодирования символов ASCII и обеспечивает ввод информации из регистратора в компьютер пользователя через COM-порт. В процессе функционирования системы средства измерений работают независимо. После окончания операции пользователь подключает регистратор к соответствующему средству измерений температуры, результаты измерений переносятся в память регистратора. Затем регистратор подключается к компьютеру, и осуществляется ввод информации через штатные устройства ввода–вывода.

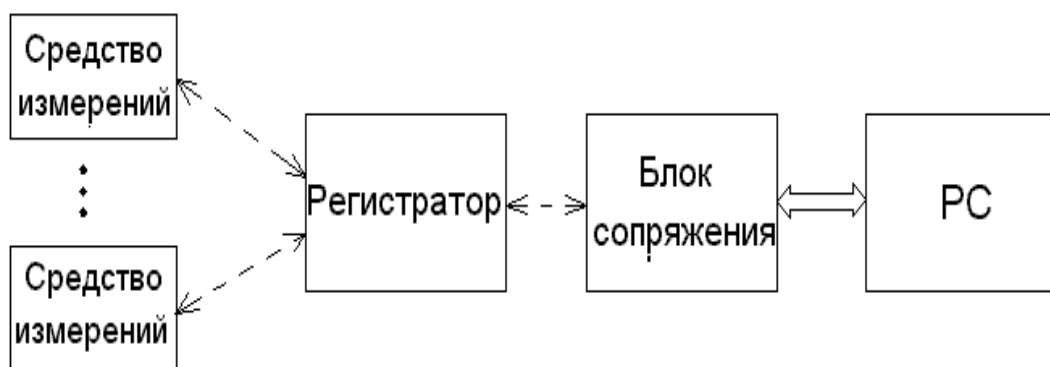


Рисунок 4.18 – Структура информационно – измерительной системы с асинхронной передачей измерительной информации

Программное обеспечение прибора обеспечивает занесение в память результатов аналого-цифрового преобразования с привязкой их ко времени за счёт приписывания номера измерения с момента начала операции и перепись зарегистрированной измерительной информации в память регистратора.

Интерфейс пользователя ИИС контроля термических операций с асинхронной передачей информации представлен на рисунке 4.19.

Последующая обработка информации в компьютере может включать в себя следующие этапы: фильтрация промахов по статистическим критериям; цифровая частотная фильтрация; определение закона распределения по статистическим критериям; статистическая фильтрация и определение

статистических характеристик процессов (математическое ожидание, дисперсия) при многократных измерениях. Возможен расчет статистических границ и построение карт контроля качества производственных процессов. Программное обеспечение ИИС позволяет заносить данные о производственной операции в базу данных служебной информации (ФИО оператора, порядковый номер производственного цикла, заводские номера электропечи и измерителя-регулятора температуры, коды деталей и операции, время начала и продолжительность регистрации процесса). Имеется возможность просмотра результатов измерения как в цифровой, так и в графической форме, автоматически создается протокол выполнения операции.

Регистрация режима термической обработки

Файл Настройка Помощь

Параметры, вводимые оператором

Ф.И.О. оператора: Сидоров С.С.

Пор. № технологич. цикла: 101

Зав.номер электропечи: 24-356-90

Зав.номер измерителя-регулятора температуры: 006

Код детали: ППР-35-87-98

Код технологич. операции: КР34-8

Интервал времени между измерениями (в минутах): 2

Время начала регистрации: 10:05 25.01.03

Время записи в базу данных: 09:48:22 26/01/2003

Параметры, принятые с регистратора

Время начала: 09:38:19 26/01/2003

Время завершения: 18:56:19 27/01/2003

Температура, С: нач. 200, max 1162, конечн. 37

Зав.номер регистратора: 23572

База данных

Порядковый № технологич.цикла

007
01
02
03
04
1
101
102
1-1
1-2
1-3
2
2-1
2-2
2-3
3
4

Ввод с регистратора

☒ Просмотр данных

0	200
1	192
2	184
3	177
4	170
5	164
6	158
7	154
8	150
9	148
10	147
11	146
12	148
13	150
14	153
15	158

Температура, С

1 000
800
600
400
200

0 200 400 600 800 1 000

время, мин

Сохранение результатов регистрации в базе данных

Протокол

Выход

Рисунок 4.19 – Интерфейс пользователя ИИС контроля термических операций с асинхронным режимом работы

Применение ИИС с асинхронной передачей измерительной информацией значительно упрощает и удешевляет модернизацию технологического и контрольно-измерительного оборудования, используемого при производстве изделий электронной техники. В этом случае отпадает необходимость прокладывать десятки метров кабеля, соединяя приборы, входящие в систему, между собой и с компьютером в производственных помещениях. За счёт этого минимизируются потери информации, вызванные высоким уровнем электромагнитных помех.

4.6 РАЗРАБОТКА ПРЕЦИЗИОННОГО БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО ЧАСТОТОМЕРА ЧАСТОТЫ СИНУСОИДАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Частота напряжения питания измерительной схемы является одним из параметров комбинированной модели гетерогенного объекта. Отличие значения частоты, используемого при вычислениях, от ее действительного значения вызывает появление составляющей основной погрешности измерения СКС. Снижение этой составляющей общей погрешности измерения возможно путем измерения частоты как величины обратной периоду напряжения питания измерительной схемы.

Измерение периода синусоидального сигнала обычно выполняется счетно-импульсным методом: подсчетом импульсов опорной частоты в течение интервала времени, равного периоду измерительного сигнала [119].

Известно, что при нестабильности длительности периода сигнала нахождение среднего значения частоты по ее мгновенным значениям приводит к появлению методической погрешности [120]. Причиной появления этой погрешности является нелинейность зависимости между периодом и частотой. Отсутствие методической погрешности достигается нахождением среднего значения частоты как величины обратной среднему значению периода. Этот факт необходимо учитывать при разработке устройств для измерения

параметров сигналов с нестабильной частотой, в частности, при питании измерительной схемы напряжением промышленной сети.

Устройства для измерения частоты по периоду сигнала традиционно строятся на основе двухтактных интегрирующих АЦП [121]. При этом используется гиперболическая зависимость между длительностью информативного интервала времени и опорным напряжением. До начала аналого-цифрового преобразования осуществляется формирование опорного напряжения пропорционального периоду входного сигнала. За счет этого формируется линейная зависимость выходной кода АЦП от частоты сигнала.

Возможность снижения инструментальной погрешности измерения при использовании таких АЦП ограничивается тем, что в функцию преобразования входят постоянные времени интегрирования одного или двух интеграторов. В связи с этим имеет место влияние на результат измерения частоты температурных коэффициентов сопротивления и емкости резисторов и конденсаторов интегрирующих цепей АЦП.

С целью достижения минимальной для данного вида АЦП инструментальной погрешности измерения разработан способ измерения частоты, при реализации которого в функцию преобразования не входит постоянные времени интегрирования [122]. Структура цифрового частотомера, реализующего данный способ, представлена на рисунке 4.20.

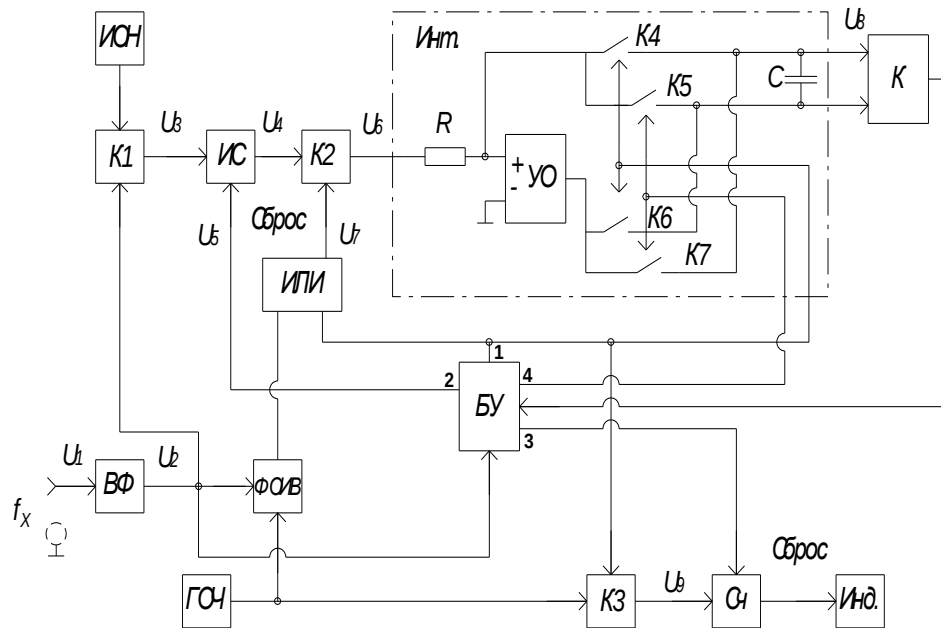


Рисунок 4.20 – Структура цифрового частотомера

Устройство состоит из источника опорного напряжения *ИОН*, интегратора со сбросом *ИС*, интегратора *Инт.* на основе операционного усилителя *ОУ*, компаратора *Км*, генератора импульсов опорной частоты *ГОЧ*, счетчика *Сч*, индикатора *Инд.*, входного формирователя *ВФ*, формирователя опорного интервала времени *ФОВ*, блока управления и аналоговых ключей *K1 – K7*.

Временные диаграммы функционирования цифрового частотомера представлены на рисунке 4.21.

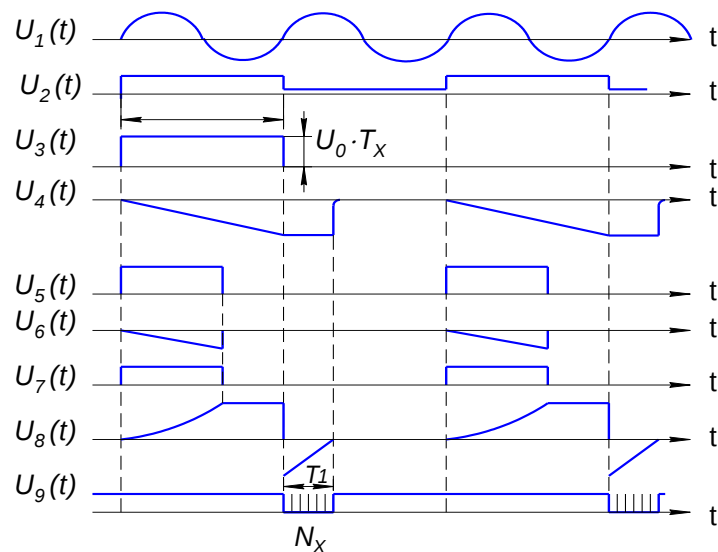


Рисунок 4.21 – Временные диаграммы работы цифрового частотомера

Устройство работает следующим образом. При отсутствии сигнала с измеряемой частотой на входе устройства ключи $K1$ - $K3$ разомкнуты, а интегратор установлен в режим «Сброс». При поступлении на вход устройства сигнала с измеряемой частотой f_X ключ $K1$ замыкается на интервал времени, длительность которого равна периоду T_X входного сигнала. В момент замыкания ключа $K1$ интегратор $ИС$ переводится в режим «Интегрирование» и начинает интегрировать опорное напряжение U_0 источника опорного напряжения $ИОН$. Одновременно формирователь $ФОИВ$ начинает формирование опорного интервала времени длительностью $T_{оп}$ путем подсчета определенного числа N_0 импульсов опорной частоты f_0 с периодом следования T_0 ($T_{оп} = N_0 \cdot T_0$). Длительность опорного интервала времени не должна превышать периода T_X сигнала. Импульс длительностью $T_{оп}$ через элемент $ИЛИ$ поступает на управляющий вход ключа $K2$, открывая его. Таким образом, по переднему фронту импульса T_X ключ $K1$ открывается на интервал времени длительностью T_X , а ключ $K2$ – на интервал времени длительностью $T_{оп}$.

В процессе интегрирования на выходе интегратора $ИС$ формируется напряжение $U_4(t)$:

$$U_4(t) = -\frac{1}{\tau_1} \int_0^t U_0 dt = -\frac{U_0}{\tau_1} \cdot t, \quad (4.42)$$

где τ_1 – постоянная времени интегрирования $ИС$.

Через замкнутый в течение опорного интервала времени ключ $K2$ напряжение $U_4(t)$ поступает на вход интегратора $Инт$. На выходе операционного усилителя $ОУ$ к моменту окончания опорного интервала времени формируется напряжение:

$$U_8(t = t_0) = -\frac{1}{\tau_2} \int_0^{t_{оп}} U_4(t) dt = \frac{U_0 \cdot t_{оп}^2}{2 \cdot \tau_1 \cdot \tau_2}, \quad (4.43)$$

где τ_2 – постоянная времени интегрирования интегратора $Инт$.

В момент окончания опорного интервала времени ключ $K2$ размыкается и накопленный за время интегрирования на конденсаторе C заряд сохраняется неизменным до окончания интервала времени T_X . Напряжение на выходе $ОУ$ при этом неизменно и составляет

$$U_8 = \frac{U_0 \cdot T_{0П}^2}{2\tau_1 \cdot \tau_2}. \quad (4.44)$$

Интегрирование опорного напряжения U_0 интегратором со сбросом $ИС$ продолжается до окончания интервала времени T_X . К моменту окончания интервала времени T_X на выходе интегратора $ИС$ формируется напряжение $U_4(t = T_X)$:

$$U_4(t = t_X) = -\frac{1}{\tau_1} \int_0^{T_X} U_0 dt = -\frac{U_0 \cdot T_X}{\tau_1}. \quad (4.45)$$

По заднему фронту импульса T_X с выхода формирователя $ФОИВ$ ключ $K1$ размыкается, прекращая интегрирование опорного напряжения U_0 интегратором $ИС$. Одновременно ключи $K5$ и $K7$ размыкаются, а ключи $K3$, $K4$ и $K6$ замыкаются. Переключением ключей $K4 - K7$ обеспечивается переключение выводов конденсатора C , что приводит к смене полярности напряжения на выходе операционного усилителя $ОУ$ при сохранении его абсолютного значения

$$U_8(t = T_x) - U_8(t = T_0) = \frac{U_0 T_{0П}^2}{2\tau_1 \tau_2}. \quad (4.46)$$

В этот же момент ключи $K2$ и $K3$ замыкаются и начинаются интегрирование интегратором $Инт.$ напряжения $U_4(t = T_X)$ и поступление импульсов опорной частоты f_0 с генератора импульсов опорной частоты $ГОЧ$ на счетчик $Сч$. Напряжение на выходе операционного усилителя $ОУ$ при этом изменяется по закону

$$\begin{aligned}
 U_8(t = T_X + t) &= U_8(t = T_X) - \int_{T_X}^{T_X+t} U_4(t = T_X) dt = -\frac{U_0 \cdot T_{0П}^2}{2 \cdot \tau_1 \cdot \tau_2} + \frac{U_0 \cdot T_X}{\tau_1 \cdot \tau_2} \int_{T_X}^{T_X+t} dt = \\
 &= -\frac{U_0 \cdot T_{0П}^2}{2 \cdot \tau_1 \cdot \tau_2} + \frac{U_0 \cdot T_X}{\tau_1 \cdot \tau_2} \cdot t.
 \end{aligned} \tag{4.47}$$

Конденсатор C разряжается, и момент его полного разряда фиксируется компаратором K_M . Длительность интервала времени T_1 , за который конденсатор C полностью разряжается, определяется из уравнения

$$\frac{U_0 T_{0П}^2}{2 \tau_1 \tau_2} + \frac{U_0}{\tau_1 \tau_2} \cdot T_X \cdot T_1 = 0 \tag{4.48}$$

Отсюда

$$T_1 = \frac{T_{0П}^2}{2T_X}. \tag{4.49}$$

В момент фиксации компаратором K_M нулевого напряжения на конденсаторе C устройство возвращается в исходное состояние: ключи $K1-K4$, $K6$ закрыты, ключи $K5$ и $K7$ открыты, интегратор $СИ$ установлен в режим «Сброс». За интервал времени T_1 в счетчик $Сч$ поступает $N_X = T_1 \cdot f_0$ импульсов опорной частоты. К концу интервала времени T_1 в счетчике $Сч$ формируется код результата измерения N_X , который индицируется индикатором $Инд$.

$$N_X = T_1 \cdot f_0 = \frac{T_{0П}^2}{2T_X} \cdot f_0 = \frac{N_0^2 \cdot f_0}{2f_0^2 \cdot T_X} = \frac{N_0^2}{2f_0} \cdot f_X. \tag{4.50}$$

Инструментальная погрешность измерения частоты не зависит от постоянных времени интегрирования и определяется только нестабильностью опорной частоты f_0 .

4.7 ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТОЛСТОПЛЕНОЧНОГО РЕЗИСТОРА ОТ НАПРЯЖЕНИЯ

Исследование зависимости сопротивления толсто пленочного резистора от напряжения проводится путем совместных измерений сопротивления резистора и напряжения постоянного тока на нем. В соответствии с ГОСТ 21342.17–78 для резисторов относительное изменение сопротивления от изменения напряжения определяется по формуле

$$\delta R_U = \frac{R_{100} - R_{10}}{R_{10}} \cdot 100, \quad (4.51)$$

где R_{100} – сопротивление резистора при предельном рабочем напряжении (100%), R_{10} – сопротивление резистора при напряжении, равном 10% предельного рабочего напряжения.

С целью измерения сопротивления резистора при постоянном напряжении на объекте измерения более 1 кВ разработана установка для исследования зависимости сопротивления толсто пленочного резистора от напряжения [123].

Два состояния измерительной схемы описываются системой уравнений

$$\begin{cases} U_1 = \frac{U_S \cdot R_{01}}{R_X + R_{01}} \\ U_2 = \frac{U_S \cdot R_{02}}{R_X + R_{02}} \end{cases}, \quad (4.52)$$

Данная система имеет решения

$$\begin{aligned} R_X &= \frac{R_{01}R_{02}(U_1 - U_2)}{U_2R_{01} - U_1R_{02}} \\ U_X &= \frac{U_1U_2(R_1 - R_2)}{U_2R_{01} - U_1R_{02}} \end{aligned} \quad (4.53)$$

Регулируемыми параметрами измерительной схемы являются сопротивления R_{01} и R_{02} . Очевидно, что при $R_{01} = R_{02}$ система имеет

бесконечное множество решений, т.е. чувствительность к измеряемым величинам равна нулю. Чувствительность преобразования определяется углом пересечения графиков функций, соответствующих уравнениям измерения (4.1).

$$\phi = \arctg\left(\frac{U_S \cdot R_X}{(R_{01} + R_X)^2}\right) - \arctg\left(\frac{U_S \cdot R_X}{(R_{02} + R_X)^2}\right), \quad (4.54)$$

Анализ уравнения (4.54) показывает, что максимальное значение угла ϕ при достигается при минимально возможном значении сопротивления R_{01} и максимально возможным значении сопротивления R_{02} .

Минимальное сопротивление опорного резистора R_{0MIN} определяется тем, что падение напряжения на нем тока через измерительную схему должно превышать порог чувствительности АЦП U_{0MIN} .

$$R_{0MIN} \geq \frac{U_{0MIN} \cdot R_{XMAX}}{U_{SMIN} - U_{0MIN}}, \quad (4.55)$$

где R_{XMAX} – максимальное значение сопротивления R_X , U_{SMIN} – минимальное значение напряжения питания измерительной схемы.

Минимальное напряжение питания U_S определяется требованием ГОСТ 21342.17–78 по выполнению условия $U_{SMIN} \leq 0,1U_S$. При использовании 12-разрядного АЦП напряжения с диапазоном входного напряжения 10В при $U_S = 10$ кВ и $R_X = (10 \pm 0.1)$ ГОм получаем $R_{0MIN} \geq 25$ кОм.

Максимальное сопротивление опорного резистора ограничивается при неизменном напряжении питания требованием ГОСТ 21342.17–78 выполнения условия $U_{0MAX} \leq 0,1U_S$, следовательно, $R_{0MAX} = 0,11R_{XMIN}$, где R_{XMIN} – минимальное значение сопротивления R_X . Отсюда $R_{0MAX} \approx 1$ ГОм.

С учетом проведенных расчетов при $R_{01} = R_{0MIN}$ и $R_{02} = R_{0MAX}$ из (4.54) максимальное значение угла $\phi_{MAX} = 1,7 \cdot 10^{-2}$ рад.

Исходя из (4.3) основная относительная погрешность измерения сопротивления δR_X и напряжения δU_X определяется уравнениями:

$$\begin{aligned}\delta R_X &= \sqrt{\delta_R^2(R_{01}) + \delta_R^2(R_{02}) + \delta_R^2(U_1) + \delta_R^2(U_2)}; \\ \delta U_X &= \sqrt{\delta_U^2(R_{01}) + \delta_U^2(R_{02}) + \delta_U^2(U_1) + \delta_U^2(U_2)}.\end{aligned}\quad (4.56)$$

$$\text{Здесь } \delta_R(R_{01}) = \frac{\partial R_X}{\partial R_{01}} \cdot \frac{R_{01}}{R_X} \cdot \delta R_{01} = -\frac{R_{02}^2(U_1 - U_2)U_1}{(U_2 R_{01} - U_1 R_{02})^2} \cdot \frac{R_{01}}{R_X} \cdot \delta R_{01} \quad (4.57)$$

$$\delta_R(R_{02}) = \frac{\partial R_X}{\partial R_{02}} \cdot \frac{R_{02}}{R_X} \cdot \delta R_{02} = \frac{R_{01}^2(U_1 - U_2)U_2}{(U_2 R_{01} - U_1 R_{02})^2} \cdot \frac{R_{02}}{R_X} \cdot \delta R_{02} \quad (4.58)$$

$$\delta_R(U_1) = \frac{\partial R_X}{\partial U_1} \cdot \frac{U_1}{R_X} \cdot \delta U_1 = \frac{R_{01} R_{02} U_2 (R_{01} - R_{02})}{(U_2 R_{01} - U_1 R_{02})^2} \cdot \frac{U_1}{R_X} \cdot \delta U_1 \quad (4.59)$$

$$\delta_R(U_2) = \frac{\partial R_X}{\partial U_2} \cdot \frac{U_2}{R_X} \cdot \delta U_2 = -\frac{R_{01} R_{02} U_1 (R_{01} - R_{02})}{(U_2 R_{01} - U_1 R_{02})^2} \cdot \frac{U_2}{R_X} \cdot \delta U_2 \quad (4.60)$$

$$\delta_U(R_{01}) = \frac{\partial U_X}{\partial R_{01}} \cdot \frac{R_{01}}{U_X} \cdot \delta R_{01} = -\frac{U_1 U_2 R_{02} (U_1 - U_2)}{(-U_2 R_{01} + U_1 R_{02})^2} \cdot \frac{R_{01}}{U_X} \cdot \delta R_{01} \quad (4.61)$$

$$\delta_U(R_{02}) = \frac{\partial U_X}{\partial R_{02}} \cdot \frac{R_{02}}{U_X} \cdot \delta R_{02} = \frac{U_1 U_2 R_{01} (U_1 - U_2)}{(U_1 R_{02} - U_2 R_{01})^2} \cdot \frac{R_{02}}{U_X} \cdot \delta R_{02} \quad (4.62)$$

$$\delta_U(U_1) = \frac{\partial U_X}{\partial U_1} \cdot \frac{U_1}{U_X} \cdot \delta U_1 = \frac{U_2^2 (R_{01} - R_{02}) R_{01}}{(U_1 R_{02} - U_2 R_{01})^2} \cdot \frac{U_1}{U_X} \cdot \delta U_1 \quad (4.63)$$

$$\delta_U(U_2) = \frac{\partial U_X}{\partial U_2} \cdot \frac{U_2}{U_X} \cdot \delta U_2 = -\frac{U_1^2 (R_{01} - R_{02}) R_{02}}{(U_1 R_{02} - U_2 R_{01})^2} \cdot \frac{U_2}{U_X} \cdot \delta U_2. \quad (4.64)$$

Относительные погрешности δR_{01} и δR_{02} определяются допустимым отклонением сопротивления от номинального значения для опорных резисторов, которое для прецизионных резисторов составляет $\pm (0.02 - 0.05)\%$.

Погрешности δU_1 и δU_2 определяются погрешностью аналого-цифрового преобразования соответствующего напряжения. При использовании 12-разрядного АЦП погрешность δU_1 не превысит $\pm 0,05\%$.

Напряжение U_2 на втором опорном резисторе, сопротивление которого больше сопротивления первого опорного резистора, может превышать верхний предел диапазона входного напряжения АЦП. Поэтому второй опорный

резистор целесообразно выполнить составным путем последовательного соединения первого опорного резистора и резистора с сопротивлением, дополняющим общее сопротивление опорной ДЭЦ до значения R_{02} .

В связи с этим погрешность измерения напряжения U_1 определяется уравнением

$$\delta U_2 = \delta_{АЦП} \pm \delta K_D, \quad (4.65)$$

где K_D – коэффициент деления делителя опорной ДЭЦ.

С учетом того, что $R_{02} \gg R_{01}$, имеем $K_D = \frac{R_{01}}{R_{02} + R_{01}} \approx \frac{R_{01}}{R_{02}}$ и

$$\delta U_2 = \sqrt{(\pm \delta_{АЦП}^2 \pm \delta R_{01}^2 \pm \delta R_{02}^2)}. \quad (4.66)$$

При $U_X = 15$ кВ, $R_X = 15$ ГОм, $R_{01} = 1$ МОм, $R_{02} = 1$ ГОм получаем для напряжений на опорных резисторах $U_1 = 1$ В, $U_2 = 1$ кВ.

Таким образом, при $\delta R_{01} = \delta R_{02} = \pm 0.05\%$, $\delta U_1 = \delta U_2 = \pm 0.02\%$, имеем $\delta R_X = \pm 0.8\%$, $\delta U_X = \pm 0.4\%$.

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что предлагаемый способ измерения сопротивления обеспечивает погрешность измерения сопротивления и напряжения в требуемых диапазонах не более $\pm 1\%$ при приемлемых требованиях к опорным элементам. Таким образом, разработанная установка удовлетворяет установленным требованиям к относительной погрешности измерения сопротивления резистора под рабочим напряжением и относительной погрешности измерения рабочего напряжения не более $\pm 2\%$.

Внешний вид измерительной установки УВИ-1 представлен на рисунке 4.22.



Рисунок 4.22 – Высоковольтная измерительная установка УВИР–1

Структура установки для исследования зависимости сопротивления толсто пленочного резистора от напряжения представлена на рисунке 4.23.

Технические характеристики измерительной установки УВИ-1:

- диапазон регулирования измерительного напряжения, кВ, 5 – 20;
- относительная погрешность установки и поддержания измерительного напряжения, %, не более, ± 10 ;
- диапазон измерения сопротивления, МОм, $22 \dots 15 \cdot 10^3$;
- диапазон измерения напряжения, кВ, 1...20;
- относительная погрешность измерения сопротивления, %, не более, ± 2 ;
- относительная погрешность измерения напряжения, %, не более ± 2 ;
- габаритные размеры, мм, 650 x 1050 x 650; – масса, кг, 150.

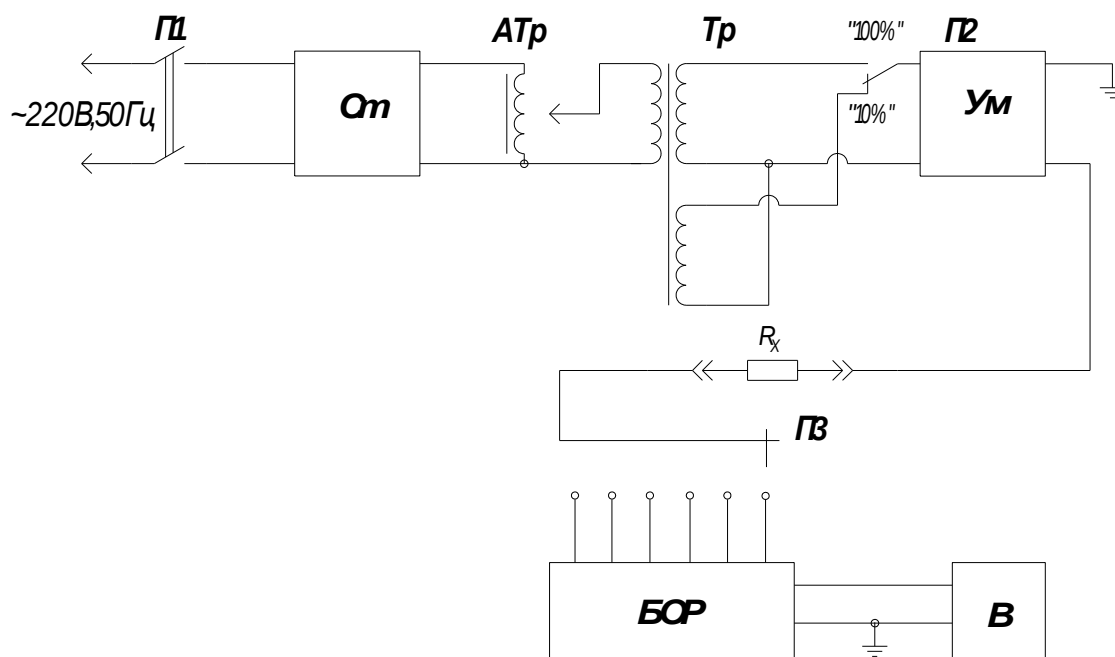


Рисунок 4.23 – Структура установки УВИ -1

Основными узлами установки являются стабилизатор напряжения промышленной сети, автотрансформатор, трансформатор напряжения с двумя выходными обмотками, умножитель напряжения, блок опорных резисторов, микропроцессорный вольтметр. Автотрансформатор обеспечивает регулирование значения сетевого напряжения для установки требуемого значения измерительного напряжения. Трансформатор с двумя выходными обмотками в зависимости от положения переключателя «10 % – 100 %» формирует на входной обмотке высоковольтного трансформатора переменное напряжение, соответствующее требуемому измерительному напряжению на объекте, или напряжение, соответствующее 10% измерительного напряжения. Умножитель напряжения построен по двухполярной схеме и формирует постоянное напряжение, значение которого равно двойной амплитуде переменного напряжения на его входе. Выходное напряжение умножителя является напряжением питания измерительной схемы установки.

Блок опорных резисторов БОР содержит три опорных трехполюсника, выполненных по схеме, представленной на рисунке 4.24. Каждый опорный двухполюсник соответствует одному из трех поддиапазонов измерения сопротивления.

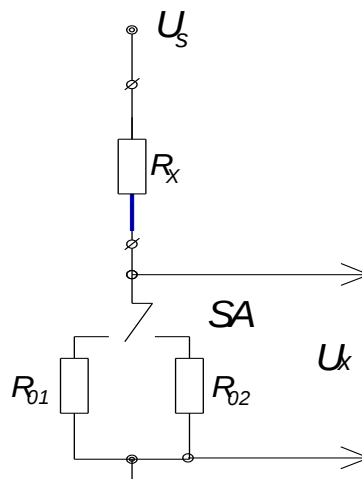


Рисунок 4.24 – Измерительная схема установки УВИ -1

Исследования зависимости сопротивления высокоомного высоковольтного резистора от напряжения на резисторе путём совместных измерений сопротивления резистора и напряжения на нём осуществляется следующим образом. Полный цикл измерения приращения сопротивления при приращении напряжения питания измерительной схемы от 10 % рабочего напряжения до 100 % осуществляется в четыре такта. Измерения напряжения на опорном резисторе проводятся при двух значениях его сопротивления при напряжении питания измерительной схемы U_{10} , составляющим 10 % предельного рабочего напряжения на объекте измерения. Затем на измерительную схему подается предельное рабочее напряжение. Повторно проводятся измерения при тех же двух значениях сопротивления. Результаты всех измерений заносятся в оперативную память микропроцессора. По результатам первой пары измерений вычисляется значение сопротивления R_{10} и более точное значение напряжения U_{10} . По значениям напряжения на опорном резисторе вычисляются значения сопротивления R_{100} и измерительное напряжение U_{100} . После выполнения измерений микропроцессорный вольтметр

установки вычисляет относительное изменение сопротивления от изменения напряжения по формуле (4.51).

Использование в установке УВИ-1 измерительной схемы в виде делителя напряжения обеспечивает ей ряд преимуществ по сравнению с установками аналогичного назначения с мостовой измерительной схемой:

- отсутствие в измерительной схеме опорных элементов с предельным рабочим напряжением более 1 кВ при напряжении на объекте измерения до 25 кВ;
- возможность измерения напряжения на объекте измерения с минимальными дополнительными аппаратными затратами (резистор и переключатель);
- увеличение сопротивления нагрузки высоковольтного источника напряжения по сравнению с мостовой измерительной схемой за счет исключения опорного делителя.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

1 Разработан способ измерения стандартизованных ПКС высоковольтных электроизоляционных конструкций под рабочим напряжением, основанный на использовании несинусоидальности напряжения сети, спектральный анализ которого проводится модифицированным методом Прони. Предложенный способ измерения обеспечивает более высокую достоверность контроля стандартизованных параметров изолятора по сравнению с существующим неравновесно-компенсационным методом и позволит перейти на систему технического обслуживания энергетических сетей по состоянию.

2 При измерении параметров комплексного сопротивления высокоомных цепей устройствами с коммутируемой измерительной схемой обработка отсчетов напряжения на опорном элементе методом Прони позволяет не менее чем в два раза уменьшить время измерения при пренебрежимо малой методической составляющей погрешности измерения по сравнению с ее инструментальной составляющей путем определения установившегося

значения амплитуды напряжения до окончания переходного процесса, возникающего при коммутации опорного элемента.

3 Разработаны высокочувствительные измерительные преобразователи модуля комплексного сопротивления диэлькометрического датчика с гетерогенным объектом для двухэлектродных и дифференциальных емкостных диэлькометрических датчиков с формированием на датчике синусоидального напряжения частотой до 5 МГц.

4 Требованиям к датчикам температуры для измерений температуры гетерогенных объектов в наибольшей степени удовлетворяют термопреобразователи сопротивления, изготовленные по тонкопленочной и фольговой технологиям. Для применения в цифровых термометрах разработаны АЦП напряжения низкого уровня с высокой помехоустойчивостью и функциональные АЦП с аналоговой, цифро-аналоговой и цифровой линеаризацией функции преобразования датчика температуры.

5 Разработан способ измерения частоты синусоидального напряжения как величины обратной периоду на основе метода интегрирующего преобразования и частотомер на его основе, методическая погрешность измерения которого определяется только нестабильностью опорной частоты, а время измерения не превышает периода измеряемого синусоидального напряжения.

6 Разработана установка для исследования зависимости сопротивления высоковольтного высокоомного толстопленочного резистора от напряжения на резисторе на основе измерительной схемы в виде делителя напряжения. Установка обеспечивает формирование на исследуемом резисторе с сопротивлением в диапазоне 22 МОм – 15 ГОм рабочего напряжения до 20 кВ при напряжении на опорных резисторах не более 1 кВ и совместное измерение сопротивления резистора под рабочим напряжением и рабочего напряжения с относительной погрешностью измерения сопротивления не более $\pm 2\%$ и относительной погрешностью измерения напряжения, не более $\pm 2\%$.

ГЛАВА 5

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГЕТЕРОГЕННОГО ОБЪЕКТА В РАБОЧИХ РЕЖИМАХ

Данная глава посвящена разработке структур информационно-измерительных и контрольно-измерительных систем для измерений функциональных параметров гетерогенного объекта в рабочих режимах в процессе производства или эксплуатации на основе измерений нелинейных составляющих комплексного сопротивления. Основные результаты исследований, представленные в данной главе, опубликованы в [1, 64, 124–128].

5.1 УНИФИЦИРОВАННЫЙ КАНАЛ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ НЕЛИНЕЙНОГО КОМПЛЕКСНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Широкий круг измерительных задач, которые решаются с использованием комбинированной модели гетерогенного объекта требует 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. Второй компонент, программа, реализующая вычисление значений искомых параметров гетерогенного объекта размещается в вычислительной подсистеме информационно-измерительной или

управляющей системы и в процессе функционирования обращается к базе данных, содержащей уравнения связи функциональных параметров и характеристик гетерогенного объекта с параметрами и характеристиками СКС, напряжения на объекте и температуры объекта.

Унифицированный канал измерения СКС и напряжения на объекте измерения информационно-измерительной системы, предназначенной для измерения функциональных параметров гетерогенного объекта, имеет структуру, представленную на рисунке 5.1 [1]. По классификации, предложенной проф. А. А. Даниловым [124], канал является сложным измерительным каналом, поскольку «представляет собой совокупность нескольких простых измерительных каналов, сигналы с выхода которых используются для получения результата косвенных, совокупных и совместных пропорционального ему сигнала».

Измерительный канал состоит из АЦП СКС, вычислительного устройства измерительного канала ВУ ИК и устройства управления измерительным каналом УУ ИК. АЦП СКС включает в себя следующие компоненты:

- Измерительная цепь, содержащая элементы коммутации, которые выполняют следующие функции: включение объекта измерения в измерительную схему АЦП СКС (ИС АЦП СКС); подключение к измерительной схеме внешнего напряжения питания, в том числе, с ненормированными метрологическими характеристиками, подключение мер пассивных электрических величин вместо объекта измерения в режиме метрологического самоконтроля (самокалибровки) измерительного канала.
- Измерительная схема АЦП СКС, содержащая элементы коммутации, которые выполняют следующие функции: подключение выходов измерительной цепи к измерительной схеме, формирование заданной структуры измерительной схемы (делитель напряжения или мостовая схема) путем включения в измерительную схему мер пассивных электрических величин, формирование различных состояний измерительной схемы в процессе измерения СКС и напряжения на объекте измерения.

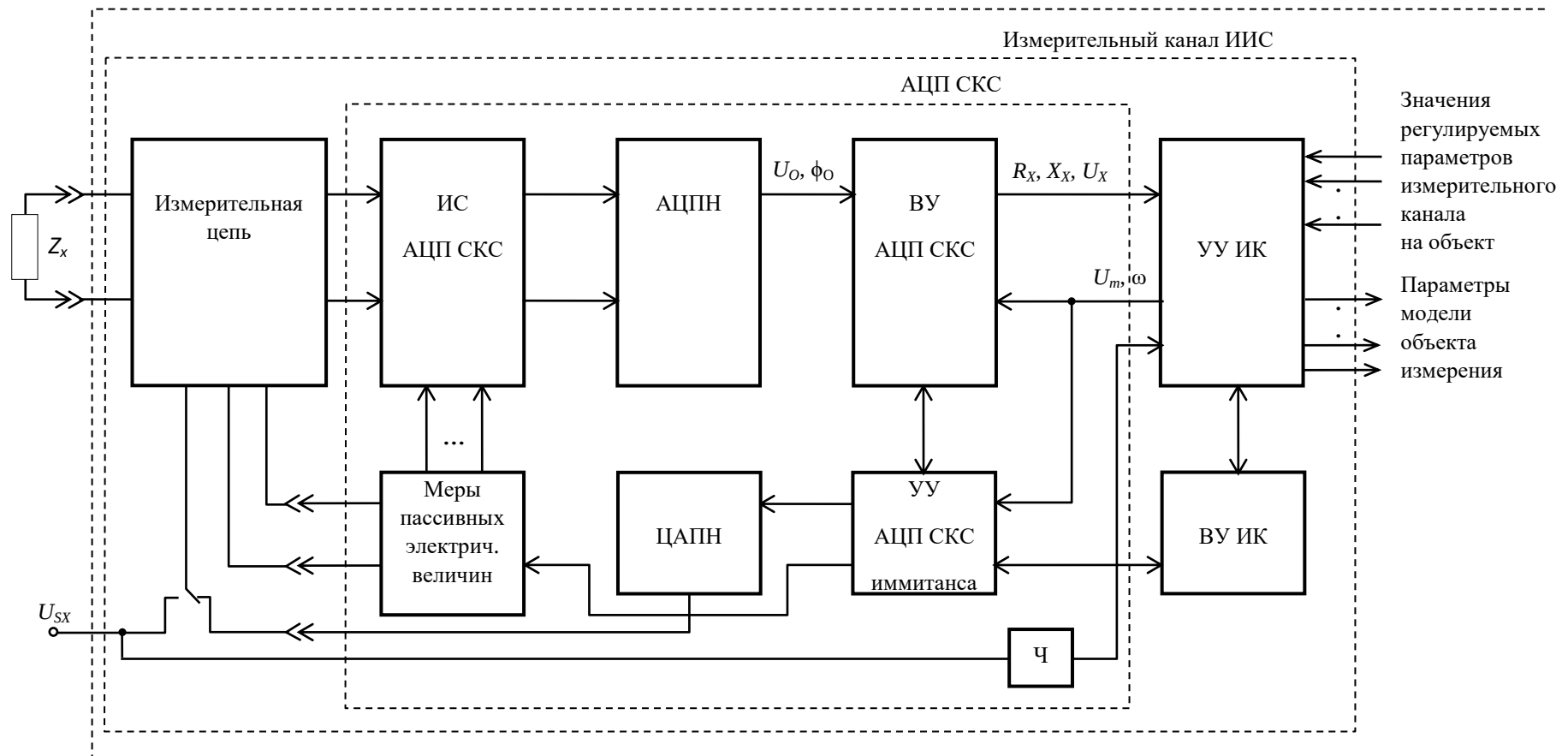


Рисунок 5.1 – Структура измерительного канала ИИС для измерений СКС и напряжения на гетерогенном объекте в рабочих режимах

- АЦП параметров выходных напряжений измерительной схемы АЦПН, включающий в себя АЦП действующего (амплитудного) значения синусоидального напряжения и/или АЦП фазового сдвига напряжений на элементах измерительной схемы выбранной базовой структуры устройства для измерений СКС.

- Вычислительное устройство ВУ АЦП СКС, которое осуществляет вычисление значений СКС и действующего (амплитудного) напряжения на объекте по результатам аналого-цифрового преобразования напряжений и/или фазового сдвига напряжений на элементах измерительной схемы ИС АЦП СКС. Вычислительное устройство ВУ АЦП СКС управляется устройством управления УУ АЦП СКС. УУ АЦП СКС также управляет цифро-аналоговым преобразователем напряжения ЦАПН, формируя синусоидальное напряжение питания с требуемыми амплитудой и частотой измерительной схемы, которое подается на измерительную цепь. Устройство управления УУ АЦП СКС также управляет формированием измерительной схемы ИС АЦП СКС из мер пассивных электрических величин.

- Цифровой частотомер Ч для измерения частоты синусоидального напряжения $U_{СХ}$ от внешнего источника питания измерительной схемы;

Вычислительное устройство ВУ АЦП СКС вычисляет значения СКС и напряжения на объекте измерения, поправки к результатам измерения по результатам измерений в режиме прямого метрологического самоконтроля.

Устройство управления УУ ИК осуществляет управление работой измерительного канала в режимах импедансной спектроскопии и импедансной вольтскопии, а также обмен измерительной и управляющей информацией с подсистемой управления ИИС. При передаче измерительной информации результаты измерений дополняются оценками погрешностей измерений и датируются.

Таким образом, разработан унифицированный канал измерения составляющих комплексного сопротивления объекта и напряжения на нем для использования в составе информационно-измерительных систем для измерений

параметров комплексного сопротивления и определения вольт – амперных и спектральных характеристик составляющих комплексного сопротивления и управляющих систем для активного многопараметрического измерительного контроля гетерогенных объектов в рабочих режимах. Канал обеспечивает формирование выбранного варианта из базы измерительных схем и питание измерительной схемы как от собственного источника синусоидального напряжения, так и от внешнего источника синусоидального напряжения, в том числе, с ненормированными метрологическими характеристиками.

Унифицированный канал измерения СКС может также использоваться как вспомогательный канал ИИС различного назначения для минимизации дополнительных погрешностей измерений в рабочих режимах функционирования гетерогенных объектов.

При амбулаторном электрографическом мониторинге состояния сердца пациента с использованием портативных электрокардиографов имеют место искажения формы регистрируемого электрокардиосигнала из-за динамических изменений комплексного сопротивления биологических тканей тела пациента между сердцем как генератором электрического напряжения и электродом электрокардиографа как входом вольтметра, что снижает достоверность оценки текущего состояния сердца. Введение в структуру электрокардиографа канала измерения СКС (рисунок 5.2) позволяет осуществлять параллельный мониторинг комплексного сопротивления биологических тканей и корректировать форму регистрируемого электрокардиосигнала [64]. Это позволило разработать ИИС амбулаторного мониторинга состояния сердца, в которой искажения формы электрокардиосигнала сопоставимы с искажениями в стационарных электрокардиографах [125].

Существующий портативный электрокардиограф, состоящий из регистратора ЭКГ, микроконтроллера и беспроводного приёмопередатчика, дополнен каналом измерения ПКС биологических тканей между сердцем и электродом прибора. Канал измерения ПКС образован генератором синусоидального напряжения U_s

с действующим значением 1 В и частотой 1 кГц, измерительной схемой в виде делителя напряжения, образованного элементом с комплексным сопротивлением $\dot{Z}_x$ и опорным элементом с сопротивлением $\dot{Z}_0$, цифровым вольтметром действующего значения и цифровым фазометром. Одновременно с регистрацией значений электрокардиосигнала ИИС периодически производит измерение модуля z_x комплексного сопротивления $\dot{Z}_x$, как внутреннего сопротивления источника сигнала. Также схема включает в себя опорный резистивный элемент Z_0 .

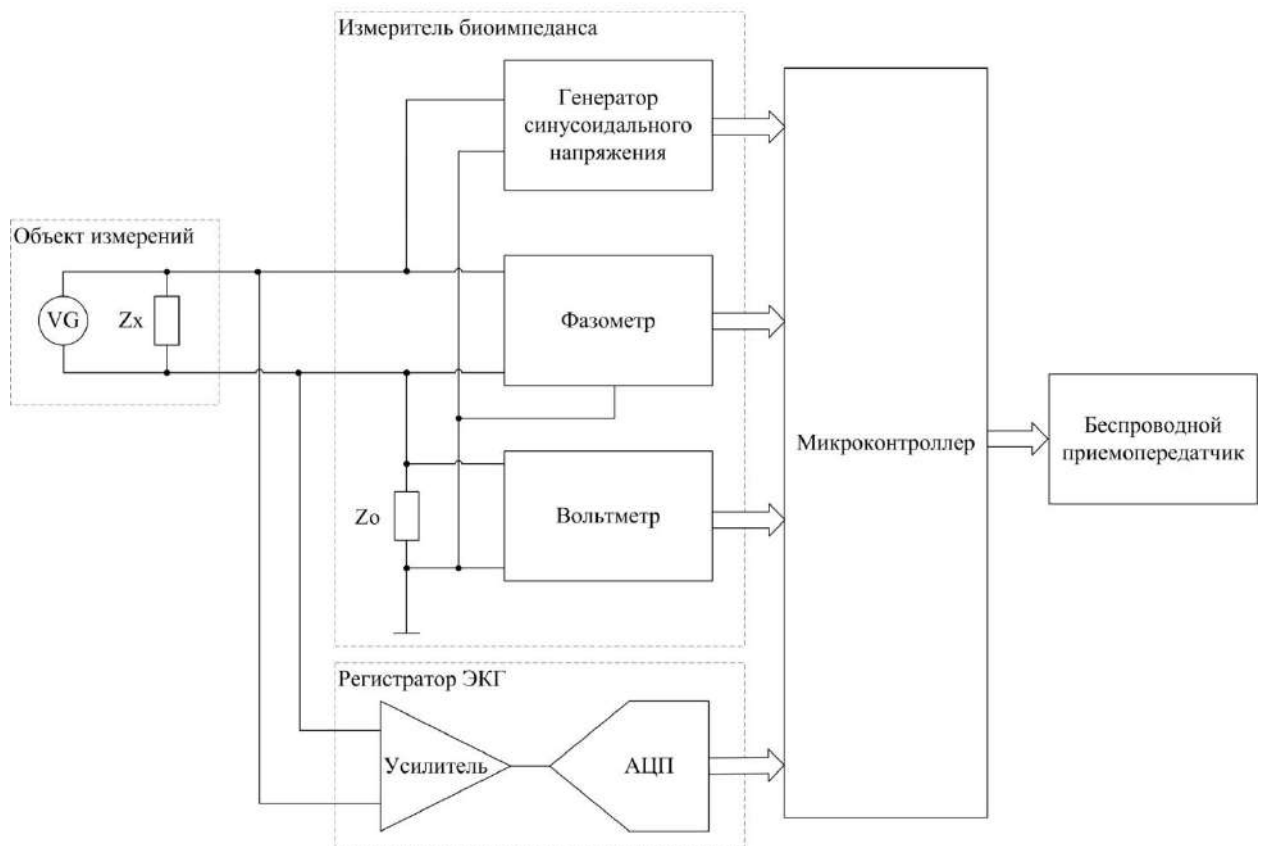


Рисунок 5.2 – Структура ИИС для мониторинга электрокардиосигнала с каналом измерения параметров показательной модели комплексного сопротивления

В процессе измерения биоимпеданса цифровой вольтметр измеряет действующее значение напряжения $\dot{U}_0$ на опорном элементе с комплексным сопротивлением $\dot{Z}_0$. Микроконтроллер по результату этого измерения вычисляет текущее значение модуля z_x комплексного сопротивления $\dot{Z}_x$ по формуле

$$z_x = \frac{(U_s - U_0)z_0}{U_0}, \quad (5.1)$$

Одновременно цифровой фазометр измеряет фазовый сдвиг φ между синусоидальным напряжением $\dot{U}_S$ генератора VG1 и напряжением $\dot{U}_0$ в средней точке делителя напряжения. На основе результатов измерений напряжения и фазового сдвига напряжений определяются параметры показательной формы комплексного сопротивления $\dot{Z}_x$:

$$\dot{Z}_x = z_x e^{j\varphi}, \quad (5.2)$$

где $e = 2,718\dots$, j – мнимая единица.

Знание комплексного сопротивления $\dot{Z}_x$ позволяет определить комплексную передаточную характеристику $S_p(\dot{Z}_x)$ паразитного фильтра, искажающего форму исходного электрокардиосигнала U_{VG} и превращающего его в регистрируемый электрокардиосигнал U_x :

$$U_x = S_p(\dot{Z}_x) U_{VG}. \quad (5.3)$$

Отсюда определяется передаточная характеристика $\dot{S}_r$ реконструирующего цифрового фильтра как обратная передаточной характеристике паразитного фильтра:

$$\dot{S}_r = 1/S_p(\dot{Z}_x). \quad (5.4)$$

Реконструкция формы электрического сигнала сердца осуществляется микропроцессором путем умножения зарегистрированных значений сигнала на передаточную характеристику S . Скорректированная кодов, описывающая неискаженную форму электрокардиосигнала, передается пользователю.

Введение унифицированного канала измерения СКС и напряжения на объекте в состав информационно-измерительных систем системы управления синтезом оксидных покрытий методом микродугового оксидирования [126] и методом спрей-пиролиза [127] открывает возможность эффективного многопараметрического измерительного контроля параметров производственного процесса, что обеспечивает достижение требуемых функциональных свойств изделий с покрытием, имеющих гетерогенную структуру (высокая микротвердость, износостойкость, коррозионная стойкость, жаростойкость и т.д.).

Наличие у унифицированного измерительного канала измерения СКС и напряжения на объекте режима прямого метрологического самоконтроля позволяет использовать его в составе интеллектуальных информационно-измерительных и систем контроля при многопараметрическом экологическом мониторинге территорий [128], при обслуживании технических систем по состоянию, мониторинге непрерывных технологических процессов, телемедицинском мониторинге состояния больного. Функционирование информационно-измерительной системы в режиме многопараметрического мониторинга определяет специфическую архитектуру её программного обеспечения [129]. В ходе первичной обработки разнородная измерительная информация, поступающая с многочисленных измерительных каналов измерительных и управляющих систем, должна быть преобразована в соответствующий формат данных, которые снабжаются соответствующими метками (например, временными) и другой необходимой для дальнейшего анализа сопроводительной информацией. Важным этапом представления результатов многопараметрического мониторинга конечному пользователю является визуализация результатов измерений и измерительного контроля, так как, с одной стороны, требуется детальное представление о каждом параметре, а с другой стороны необходимо оперативное формирование интегральной (обобщенной) оценки состояния объекта.

5.2 РАЗРАБОТКА СПОСОБА АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В СЛОЖНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛАХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

Аналого-цифровое преобразование физической величины, для которой принята аналоговая модель, осуществляется в цифровых средствах измерений, цифровых системах управления и связи и состоит в преобразовании аналоговой величины в числовой код. Числовое кодирование аналоговой величины позволяет вводить измерительную информацию в цифровое вычислительное устройство,

которое осуществляет регистрацию, хранение, обработку кодированной информации и представление её в форме, удобной для передачи и дальнейшего использования при наличии помех различной природы.

Величиной, наиболее часто подвергаемой аналого-цифровому преобразованию, является электрическое напряжение. Аналого-цифровое преобразование напряжения основано на сравнении преобразуемого напряжения с известным опорным напряжением. Известны различные способы аналого-цифрового преобразования напряжения, отличающиеся числом используемых в процессе преобразования уровней опорного напряжения, последовательностью проведения операций сравнения преобразуемого напряжения с одним или несколькими значениями опорного напряжения (параллельно, т.е. одновременно, или последовательно во времени), формированием опорного напряжения, изменяющегося во времени по известному, чаще всего линейному, закону, наличием или отсутствием промежуточного преобразования напряжения в процессе аналого-цифрового аналоговой величины в другую аналоговую величину, в частности, с промежуточным преобразованием в длительность временного интервала, наличием или отсутствием трансформации формы преобразуемого напряжения, в частности, посредством интегрирования.

Известен способ аналого-цифрового преобразования напряжения [119], состоящий в интегрировании преобразуемого напряжения U_x с постоянной времени τ в течение времени изменения результата интегрирования до уровня опорного напряжения U_0 , возврате результата интегрирования преобразуемого напряжения к исходному уровню путем интегрирования импульса напряжения отрицательной обратной связи прямоугольной формы амплитудой U_{oc} и длительностью t_{oc} с полярностью, противоположной полярности преобразуемого напряжения U_x с циклическим повторением описанных действий, формировании интервала времени интегрирования T_{xn} в каждом -ом цикле преобразования, определении среднего арифметического T_{xCP} длительностей интервала времени интегрирования путем счёта числа n интервалов времени интегрирования T_x в течение интервала времени $T_{np} = \frac{N_0}{f_0}$ аналого-цифрового преобразования

($T_{np} \gg T_x$), формируемого путем счета импульсов опорной частоты f_0 до определенного числа N_0 и формировании значения N_x кода результата аналого-цифрового преобразования среднего арифметического U_{xcp} значений U_{xn} преобразуемого напряжения U_x в n -ом цикле преобразования в течение интервала времени T_{np} аналого-цифрового преобразования в соответствии с выражением

$$N_x = \frac{T_{np}}{T_{XCP}} = \frac{N_0 U_{XCP}}{f_0 t_{oc} U_{oc}}. \quad (5.5)$$

Недостатками этого способа являются трансформация формы преобразуемого напряжения U_x в процессе интегрирования, потери информации о форме преобразуемого напряжения U_x в течение интервала времени t_{oc} возврата результата интегрирования преобразуемого напряжения и импульса напряжения прямоугольной формы к исходному уровню, невозможность восстановления формы преобразуемого напряжения U_x на интервале времени T_{np} аналого-цифрового преобразования по его среднему значению U_{xcp} на этом интервале.

Известен также способ аналого-цифрового преобразования напряжения [130] состоящий в циклическом, с постоянной длительностью цикла T_0 , последовательном во времени формировании K ($k = 1, 2, 3 \dots K$) уровней U_{0k} опорного напряжения U_0 в порядке возрастания с разностью между уровнями ΔU_0 , сравнении преобразуемого напряжения U_x с текущим уровнем U_{0k} опорного напряжения U_0 , регистрации момента превышения очередным уровнем U_{0k} опорного напряжения U_0 преобразуемого напряжения U_x , формировании интервала времени T_x от момента начала цикла аналого-цифрового преобразования до момента превышения очередным уровнем U_{0k} опорного напряжения U_0 напряжения ($T_x < T_0$), измерение длительности интервала времени T_x путем определения числа $N_x = f_0 T_x$ импульсов опорной частоты f_0 , формируемых в течение этого интервала времени, и формировании результата аналого-цифрового преобразования преобразуемого напряжения U_x в виде последовательности значений $N_{x1}, N_{x2}, \dots, N_{x3}$ кода результата аналого-цифрового преобразования преобразуемого напряжения U_x , формируемых через равные

интервалы времени, длительность которых равна длительности частного цикла преобразования T_0 .

Этот способ аналого-цифрового преобразования напряжения является потери информации о форме преобразуемого напряжения U_x , обусловленные его интегрированием в течение интервала времени интегрирования до и после момента регистрации превышения преобразуемого напряжения U_x очередным уровнем U_{0k} опорного напряжения U_0 , и времени возврата результата интегрирования опорного напряжения U_0 к исходному нулевому значению.

Параллельное аналого-цифровое преобразование напряжения состоит в том, что формируют K ($K > 2$) уровней U_{0k} опорного напряжения U_0 с равной разностью ΔU_0 между уровнями, формируют импульсы напряжения с известной опорной частотой f_0 в течение всего времени T_{np} аналого-цифрового преобразования; формируют частные циклы преобразования равной длительности T_0 путём отсчетов определенного числа N_0 импульсов напряжения с опорной частотой f_0 ; сравнивают преобразуемое напряжение U_x со всеми K уровнями U_{0k} опорного напряжения U_0 параллельно во времени в течение всего интервала времени преобразования T_{np} ; регистрируют одновременно результаты сравнения преобразуемого напряжения U_x со всеми K уровнями U_{0k} опорного напряжения U_{0k} через равные интервалы времени длительностью T_0 ; формируют результат аналого-цифрового преобразования преобразуемого напряжения U_x в виде последовательности значений $N_{x1}, N_{x2}, N_{x3}, \dots$ позиционного двоичного кода, определяемого результатами параллельного сравнения преобразуемого напряжения U_x с уровнями U_{0k} опорного напряжения U_0 , формируемых через равные интервалы времени длительностью T_0 . Параллельное аналого-цифровое преобразование характеризуется потерями информации о форме преобразуемого напряжения U_x между моментами одновременной регистрации результатов сравнений преобразуемого напряжения со всеми K уровнями U_{0k} опорного напряжения U_0 , следующими через равные интервалы времени длительностью T_0 .

На рисунке 5.3 показано, что результат аналого-цифрового преобразования в виде последовательности значений $N_{x1}, N_{x2}, N_{x3}, \dots$ позиционного кода, формируемых через интервалы времени длительностью T_0 в моменты времени

$t_1, t_2, t_3, \dots$ не содержит информации о том, преобразуемое напряжение U_x превысило уровень U_{02} опорного напряжения U_0 в течение интервала времени t от момента времени t_5 до момента времени t_8 и уровня U_{03} опорного напряжения U_0 в течение интервала времени t от момента времени t_6 до момента времени t_7 (рисунок 5.3).

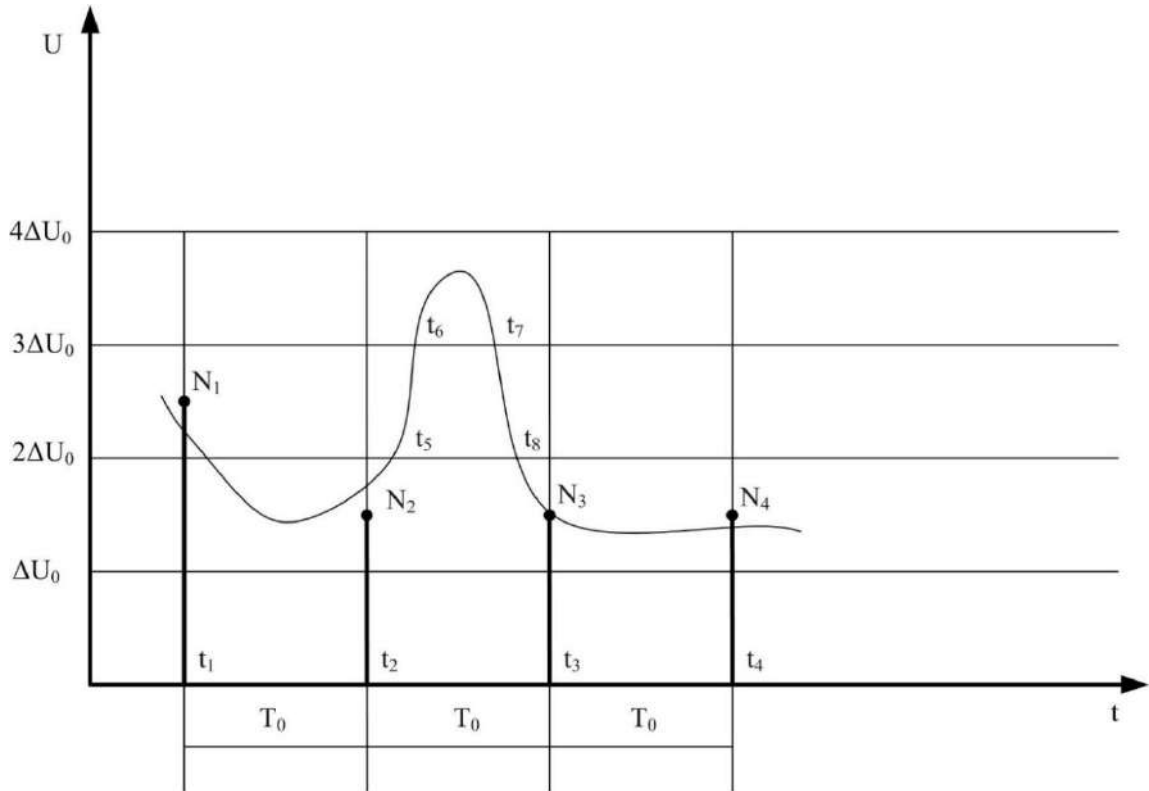


Рисунок 5.3 – Потери информации о форме преобразуемого напряжения в процессе параллельного аналого-цифрового преобразования

Причина возникновения этого недостатка состоит в том, что регистрация результатов сравнения преобразуемого напряжения U_x с уровнями U_{0k} опорного напряжения U_0 осуществляется через интервалы времени длительностью T_0 . Моменты регистрации не зависят от формы напряжения U_x , в частности, от моментов равенства преобразуемого напряжения U_x одному из уровней U_{0k} опорного напряжения U_0 .

Для минимизации потерь информации в процессе аналого-цифрового преобразования напряжения, обусловленных как трансформацией формы преобразуемого напряжения в этом процессе, так и независимостью моментов регистрации результатов сравнений преобразуемого напряжения от текущего

значения преобразуемого напряжения разработан способ аналого-цифрового преобразования напряжения, свободный от указанных недостатков, реализуется в соответствии с алгоритмом, приведенным на рисунке 5.4 [131].

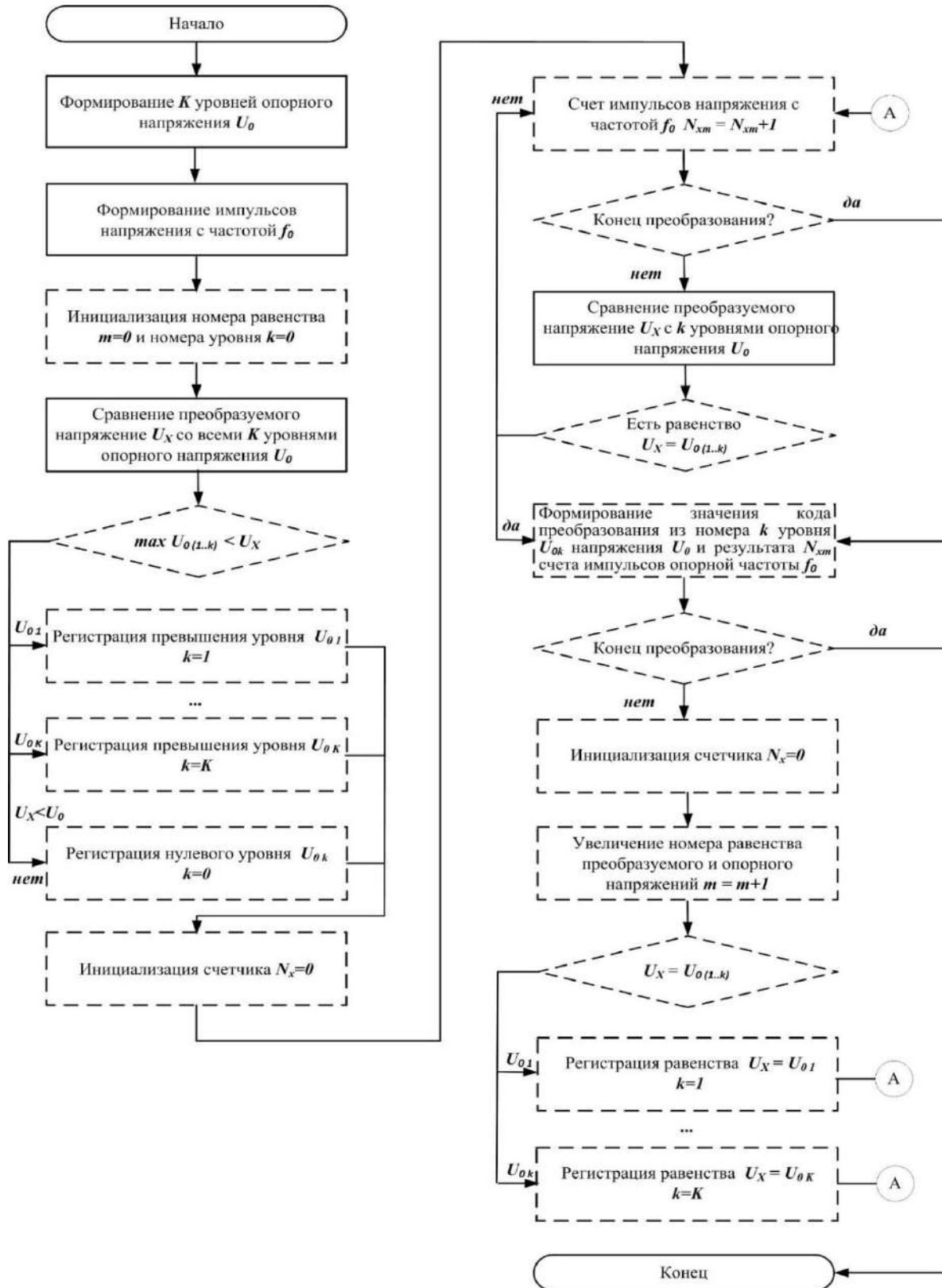


Рисунок 5.4 – Алгоритм аналого-цифрового преобразования напряжения

Способ аналого-цифрового преобразования заключается в том, что в течение интервала времени преобразования T_{np} формируют K уровней U_{0k} опорного напряжения U_0 в диапазоне изменения преобразуемого напряжения U_x , причем

$k > 2$, а разности ΔU_0 между уровнями U_{0k} опорного напряжения U_0 устанавливаются равными. Одновременно формируются счетные импульсы напряжения с известной опорной частотой f_0 .

В течение всего времени аналого-цифрового преобразования преобразуемое напряжение U_x сравнивается с K уровнями U_{0k} опорного напряжения U_0 параллельно во времени. В процессе преобразования регистрируют и нумеруют каждый i -й момент равенства преобразуемого напряжения U_x какому-либо из уровней U_{0k} опорного напряжения U_0 .

С момента начала интервала времени преобразования T_{np} осуществляют регистрацию и нумерацию m ($m = 0, 1, 2, 3 \dots$) моментов равенства преобразуемого напряжения U_x одному из уровней U_{0k} опорного напряжения U_0 , при этом момент начала интервала времени преобразования T_{np} считают моментом равенства преобразуемого напряжения U_x одному из уровней U_{0k} опорного напряжения U_0 с присвоением номера $m = 0$. В этот же момент времени определяют начальное значение переменной K . Переменной K присваивают номер большего из уровней U_{0k} опорного напряжения U_0 , меньших уровня преобразуемого напряжения U_x .

С момента начала интервала времени преобразования T_{np} производится измерение длительности интервала времени от начала аналого-цифрового преобразования до момента, которому присваивают номер $m = 1$, равенства преобразуемого напряжения U_x одному из уровней U_{0k} опорного напряжения U_0 а путем счета количества импульсов опорной частоты f_0 в течение этого интервала времени. Результат измерения длительности интервала времени N_{x0} регистрируется, и формируется значение кода результата аналого-цифрового преобразования из трёх компонентов: $m = 0, k = k_0, N_{x0}$.

Формирование значений кода результата аналого-цифрового преобразования напряжения предлагаемым способом, в отличие от параллельного аналого-цифрового преобразования, где значения кода результата аналого-цифрового преобразования формируются через интервалы времени равной длительности T_0 в моменты времени, не связанные с изменениями преобразуемого напряжения U_x , осуществляется синхронно с регистрацией моментов равенства преобразуемого напряжения U_x уровню U_{0k} опорного напряжения U_0 . Описанная последовательность действий от момента равенства преобразуемого напряжения U_x уровню U_{0k} опорного напряжения U_0 , которому присвоен номер $m = 2$ продолжается до момента окончания интервала времени преобразования T_{np} . После регистрации каждого очередного момента равенства преобразуемого напряжения U_x уровню U_{0k} опорного напряжения U_0 формируется соответствующее значение кода результата преобразования. В момент окончания интервала времени преобразования T_{np} счёт импульсов опорной частоты f_0 , начавшийся в последний момент равенства преобразуемого напряжения U_x уровню U_{0k} опорного напряжения U_0 останавливается и формируется последнее значение кода результата аналого-цифрового преобразования напряжения.

Преимуществом разработанного способа аналого-цифрового преобразования напряжения перед параллельным аналого-цифрового преобразования является минимальная динамическая погрешность преобразования за счет регистрации моментов равенства преобразуемого напряжения уровням опорного напряжения и измерения длительности интервалов времени между этими моментами, что позволяет измерять длительность интервала времени от момента начала преобразования до каждого момента равенства преобразуемого напряжения уровню опорного напряжения. Другим преимуществом разработанного способа является полное исключение возможности потери информации о изменении преобразуемого напряжения на величину, превышающую разность между соседними уровнями опорного напряжения в течение интервала времени, длительность которого меньше периода формирования кодов результата преобразования известным способом.

На рисунке 5.5 представлена временная диаграмма аналого-цифрового преобразования напряжения U_x предлагаемым способом при числе уровней $k = 6$ опорного напряжения U_0 при разности ΔU_0 между значениями уровней опорного напряжения.

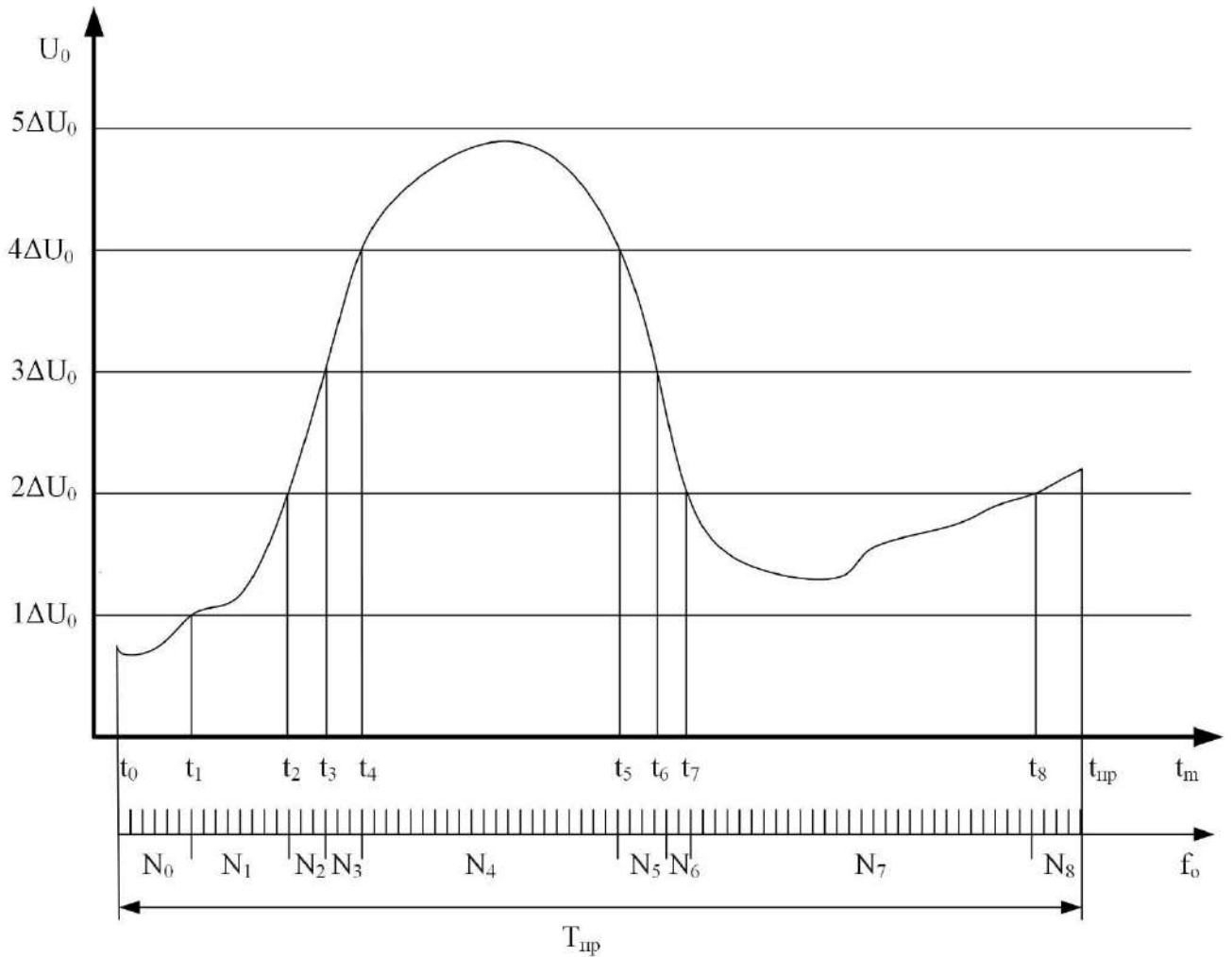


Рисунок 5.5 – Процесс аналого-цифрового преобразования напряжения

В момент начала интервала времени T_{np} аналого-цифрового преобразования напряжения $t = 0$. По результатам сравнения преобразуемого напряжения U_x со всеми шестью уровнями опорного напряжения U_0 ($k = 6$) переменной $U_0 (k = 6)k$ присваивается значение $k = 0$, поскольку в момент начала интервала времени преобразования T_{np} уровень преобразуемого напряжения U_x ниже уровня U_{01} .

В течение всего интервала времени преобразования T_{np} аналого-цифрового преобразования формируются импульсы опорной частоты f_0 . В момент начала

преобразования начинается подсчет импульсов опорной частоты f_0 , который прекращается в момент времени t_1 , в который уровень преобразуемого напряжения U_x равен первому уровню U_{01} ($k = 1$) опорного напряжения U_0 . Результат N_0 счета импульсов опорной частоты f_0 в течение интервала времени $t_1 - t_0$ совместно с номером $k = 0$ уровня опорного напряжения U_0 на этом интервале формируют первое значение кода результата аналого-цифрового преобразования предлагаемым способом: $0,0,N_{x0}$.

В момент времени t_1 переменной m присваивается значение $m = 1$, и начинается счет импульсов опорной частоты f_0 до значения N_{x1} в момент времени t_2 равенства преобразуемого напряжения U_x уровню U_{02} ($k = 2$) опорного напряжения U_0 . В момент времени t_2 формируется второе значение кода результата преобразования: $1,2,N_{x1}$.

Далее аналого-цифровое преобразование предлагаемым способом осуществляется аналогичным образом до момента времени t_8 . В момент времени t_8 регистрируется восьмой момент равенства преобразуемого напряжения U_x одному из K уровней U_{0k} опорного напряжения U_0 ($m = 8$), а именно, $k = 2$. В момент t_8 заканчивается счет импульсов опорной частоты f_0 в течение интервала времени

$t_7 - t_8$ с формированием результата счета N_{x7} , и начинается счёт импульсов опорной частоты f_0 , который должен продолжаться до следующего момента равенства преобразуемого напряжения U_x одному из уровней U_{0k} опорного напряжения U_0 , но прерывается в момент окончания интервала времени преобразования T_{np} на значении N_{x8} . Последнее значение кода на интервале времени преобразования T_{np} формируется следующим образом: уровню U_{0k} опорного напряжения U_0 на интервале времени $[t_8, T_{np}]$, приписывается номер $k = 1$.

Таким образом, за время преобразования T_{np} формируются 8 значений кода результата аналого-цифрового преобразования напряжения U_x : $0,0,N_{x0}$;

1,1, N_{x1} ; 2,2, N_{x2} ; 3,3, N_{x3} ; 4,4, N_{x4} ; 5,4, N_{x5} ; 6,3, N_{x6} ; 7,2, N_{x7} ; 8,2, N_{x8} , которые представлена в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Результаты аналого-цифрового преобразования

Интервал t	$[t_0, t_1]$	$[t_1, t_2]$	$[t_2, t_3]$	$[t_3, t_4]$	$[t_4, t_5]$	$[t_5, t_6]$	$[t_6, t_7]$	$[t_7, t_8]$	$[t_8, t_{np}]$
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

Результаты аналого-цифровым преобразования U_x используются для восстановления формы преобразуемого напряжения U_x на интервалах времени $t_m < t < t_{m+1}$ методом линейной интерполяции следующим образом:

если $U_0(t_{m+1}) = U_0(t_m) + \Delta U_0$, то интерполирующая функция на этом на этом интервале времени имеет вид

$$U_x(t_m < t < t_{m+1}) = U_0(t_m) + \frac{\Delta U_0}{N_{xm}} t; \quad (5.6)$$

если $U_0(t_{m+1}) = U_0(t_m) - \Delta U_0$, то интерполирующая функция на этом интервале времени имеет вид

$$U_x(t_m < t < t_{m+1}) = U_0(t_m) - \frac{\Delta U_0}{N_{xm}} t; \quad (5.7)$$

если, $U_x(t_m < t < t_{m+1}) = U_0(t_m)$, $m + 1$ – четное число, то интерполирующая функция на этом интервале времени имеет вид

$$U_x(t_m < t < t_{m+1}) = U_0(t_m) + \frac{\Delta U_0}{N_{xm}} \frac{t}{2} - \frac{\Delta U_0}{N_{xm}} (t - \frac{t}{2}), \quad (5.8)$$

если $U_x(t_m < t < t_{m+1}) = U_0(t_m)$, $m - 1$ – нечетное число, то интерполирующая функция на этом интервале времени имеет вид

$$U_x(t_m < t < t_{m+1}) = U_0(t_m) + \frac{\Delta U_0}{N_{xm}} \frac{t}{2} + \frac{\Delta U_0}{N_{xm}} (t - \frac{t}{2}). \quad (5.9)$$

Результат восстановления формы преобразуемого напряжения U_x по результату аналого-цифрового преобразования предлагаемым методом линейной интерполяции представлен пунктирной линией на рисунке 5.6.

Восстановление формы напряжения преобразуемого напряжения U_x возможно как после окончания интервала времени T_{np} , так и непосредственно в

процессе аналого-цифрового преобразования. Кроме линейной интерполяции, может использоваться интерполяция сплайнами второго и более высоких порядков, а также интерполяция другими функциями времени.

Другим вариантом использования результатов аналого-цифрового преобразования напряжения разработанным способом является определение распределения вероятностей приобретения преобразуемым напряжением U_x значения, принадлежащего одному из $k + 1$ интервалов ΔU_0 , на которые разделено опорное напряжение U_0 , в течение времени аналого-цифрового преобразования. При аналого-цифровом преобразовании напряжения U_x в соответствии рис. 5.4 в течение времени преобразования T_{np} получены результаты, представленные в таблице 5.2.

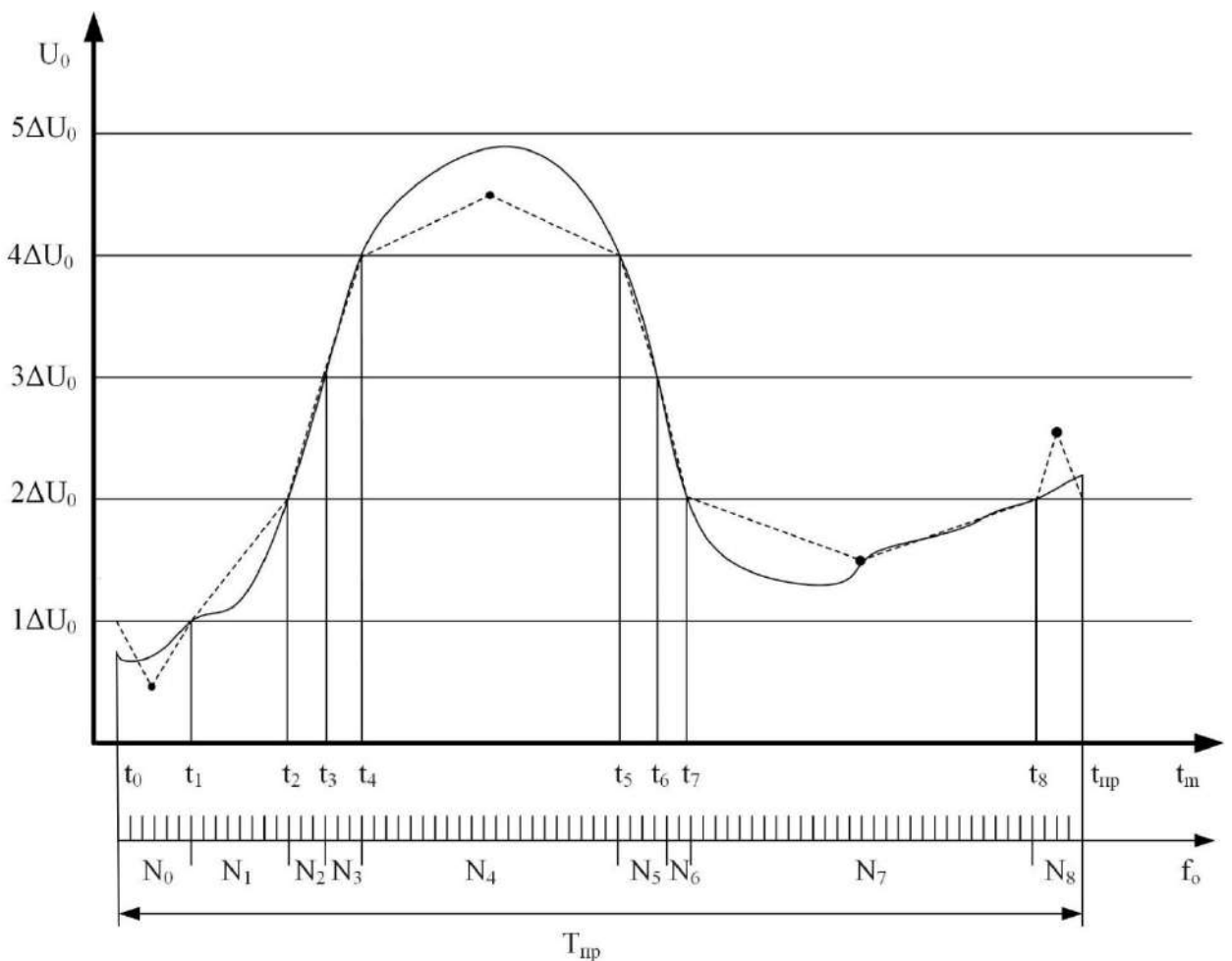


Рисунок 5.6 – Восстановление формы преобразуемого напряжения методом линейной интерполяции

Таблица 5.2 – Распределение результатов счёта импульсов опорной частоты между интервалами значений опорного напряжения U_0

Интервал опорного напряжения U_0	$[0, \Delta U_0]$	$[\Delta U_0, 2\Delta U_0]$	$[2\Delta U_0, 3\Delta U_0]$	$[3\Delta U_0, 4\Delta U_0]$	$[4\Delta U_0, 5\Delta U_0]$
Результат счёта на интервале	N_0	$N_1 + N_7$	$N_2 + N_6 + N_8$	$N_3 + N_5$	N_4
Значение результата счёта на интервале	6	36	9	7	21

Гистограмма распределения значений преобразуемого напряжения по интервалам между уровнями опорного напряжения по данным табл. 5.2 представлена на рисунке 5.7.

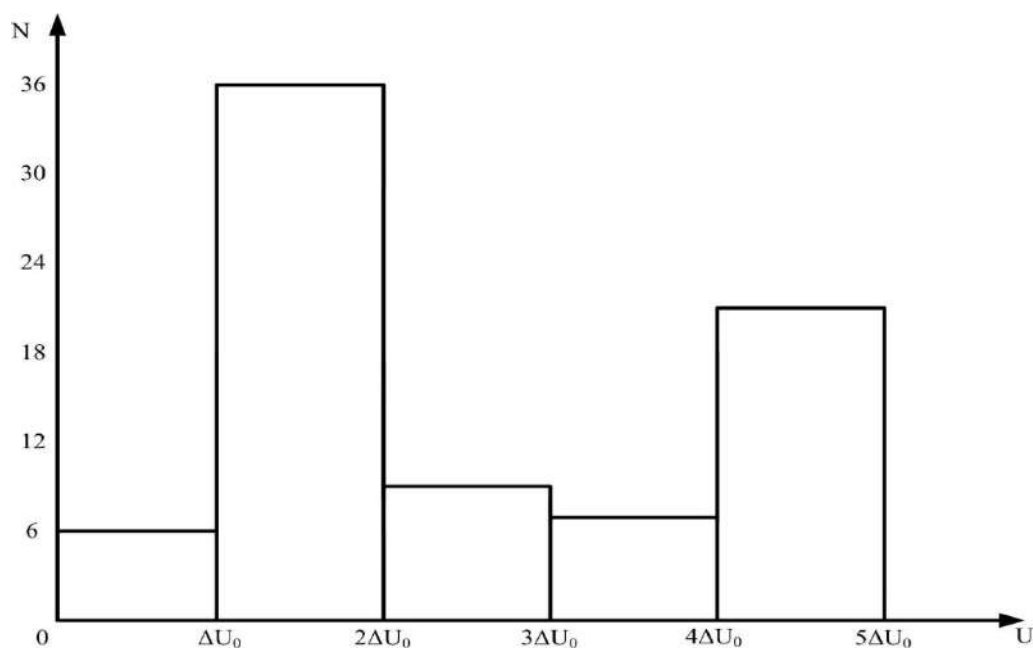


Рисунок 5.7 – Гистограмма распределения значений преобразуемого напряжения по интервалам между уровнями опорного напряжения в течение времени преобразования

Следовательно, разработанный способ аналого-цифрового преобразования напряжения при реализации в информационно-измерительных системах и измерительных каналах управляющих систем позволяет получить непараметрическую оценку распределения плотности вероятности значений преобразуемого напряжения, которая может использоваться при анализе больших объемов измерительных данных с целью извлечения информации о

функциональных параметрах и характеристиках гетерогенного объекта в рабочих режимах. Так, разработанным способом аналого-цифрового преобразования могут быть определены показатели вариативности временных параметров электрокардиографического сигнала [132].

Таким образом, разработанный способ аналого-цифрового преобразования напряжения обладает следующими преимуществами по сравнению с известными способами:

- в каждый момент равенства преобразуемого напряжения одному из уровней опорного напряжения производится отражающее это равенство изменение значения кода результата преобразования, что минимизирует динамическую погрешность, имеющую место при параллельном аналого-цифровом преобразовании, где регистрация результатов сравнения преобразуемого напряжения с уровнями опорного напряжения производится периодически независимо от изменений преобразуемого напряжения

- исключена возможность потери информации о двух моментах равенства преобразуемого напряжения одному опорному уровню в течение периода регистрации результатов сравнений преобразуемого напряжения с уровнями опорного напряжения, которая имеет место для прототипа.

5.3 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ГЕТЕРОГЕННОГО ОБЪЕКТА В РАБОЧИХ РЕЖИМАХ

Разработка унифицированного канала измерения параметров нелинейного комплексного сопротивления позволяет реализовать активный измерительный контроль состояния гетерогенного объекта по измерительной информации, получаемой путём измерений СКС, температуры объекта и других физических величин, влияющих на состояние объекта контроля, а также амплитуды напряжения и частоты синусоидального напряжения на объекте. Результаты контроля могут использоваться при управлении состоянием гетерогенного объекта или при обслуживании технических систем по состоянию.

В существующих системах многопараметрического измерительного контроля [133] осуществляется формирование диапазона допустимых значений путем установления верхних U_{Bj} и нижних U_{Hj} контрольных границ для каждого контролируемого параметра y_j многопараметрического объекта где $j = 1 \dots n$. Число и виды контролируемых параметров значения границ их диапазонов устанавливаются исходя из требований нормативно-технической и конструкторской документации, регламентирующей функционирование контролируемого многопараметрического объекта.

Допустимое состояние многопараметрического объекта характеризуется значениями контролируемых параметров, при которых все функциональные состояния объекта соответствуют установленным требованиям.

Критическое состояние многопараметрического объекта характеризуется значениями контролируемых параметров, при которых функциональные параметры объекта не соответствуют установленным требованиям.

На рисунке 5.8 приведено разделение диапазона изменения значений контролируемого параметра многопараметрического объекта на диапазоны допустимых и предельных значений введением нижней и верхней контрольных границ.

Результаты контроля параметров многопараметрического объекта представляются в виде матрицы состояния объекта, количество и номера элементов которой соответствуют количеству и номерам контролируемых параметров объекта, при этом элементам матрицы присваивают вычисленные значения признаков соответствия. Матрица выступает как образ состояния объекта контроля в течение заданного интервала времени.

Деление всего поля изменения значений контролируемого параметра объекта контроля на два диапазона является оптимальным только в случае, если объект контроля не является объектом управления. Для управления контролируемым процессом требуется отнесение текущего состояния объекта контроля к одному из четырёх качественно различных состояний: нормальное,

допустимое, критическое, аварийное. Введение дополнительных границ позволяет своевременно реагировать на скорость изменения контролируемого параметра и при получении сигнала о приближении значения контролируемого параметра к предупредительным границам иметь больший запас времени для принятия и осуществления управляющего решения о возвращении многопараметрического объекта в нормальное состояние.

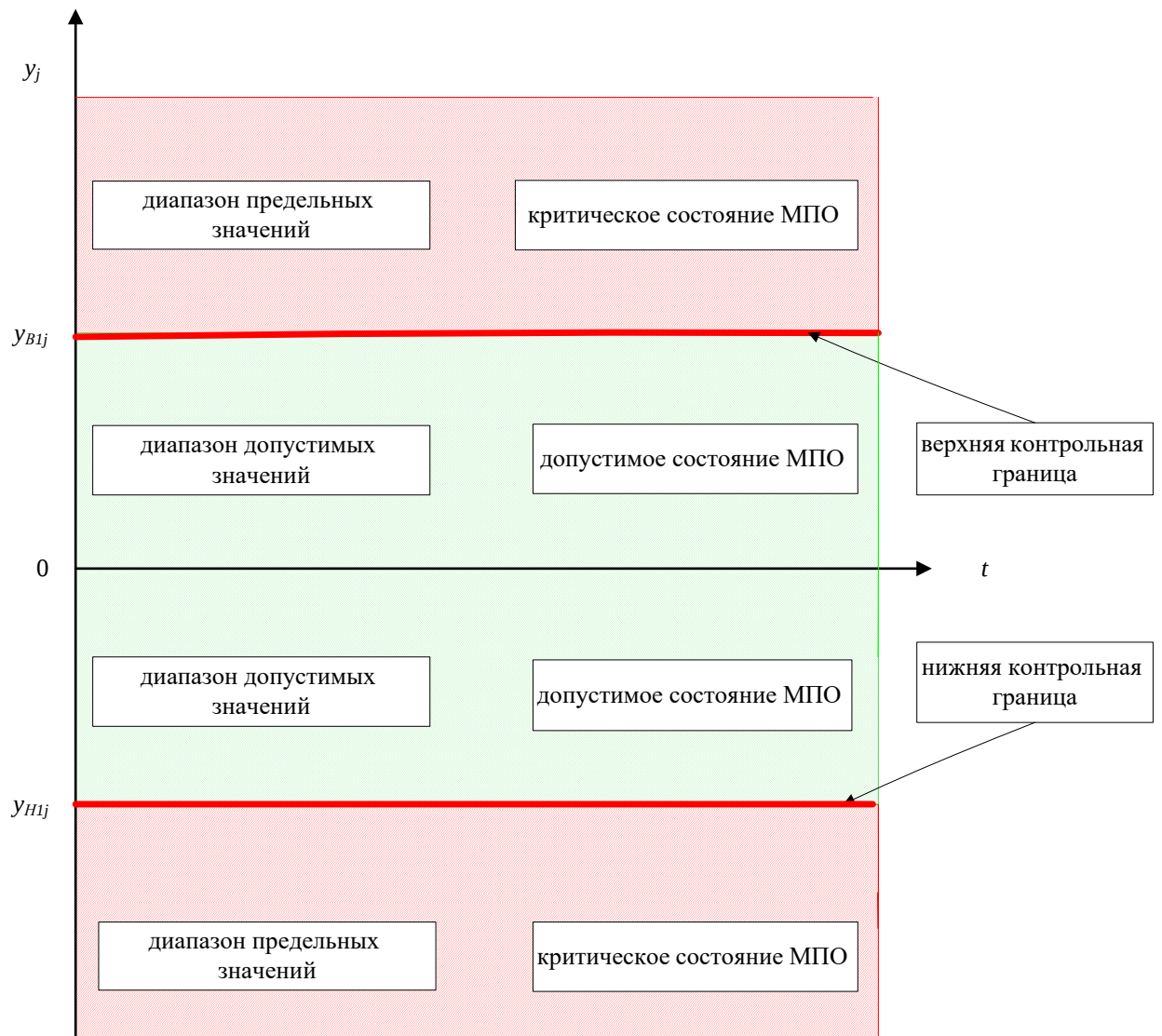


Рисунок 5.8 – Система измерительного контроля с двумя возможными состояниями объекта контроля

При пооперационном измерительном контроле производственного 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 определенным 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.

При контроле процессов производства и эксплуатации многопараметрических объектов в рабочих режимах система измерительного контроля функционируют в режиме мониторинга. Время мониторинга разделяется на интервалы времени, в течение которого значения измеряемых параметров объекта считаются постоянными. Контроль динамики производственного процесса должен осуществляться путем циклического повторения всех контрольно-измерительных операций через определенные интервалы времени и сопоставления результатов контроля в соседних циклах.

При многопараметрическом контроле имеет место противоречие между высокой достоверностью контроля, которая достигается увеличением числа измеряемых параметров объекта, и сложностью определения текущего состояния объекта контроля по большому числу результатов измерений в условиях ограниченного времени на принятие управленческого решения в ходе процесса. Отсюда возникает требование введения комплексного показателя, значение которого позволяет определить текущее состояние объекта.

Разработан способ комплексного контроля состояния многопараметрического объекта по разнородной информации, обеспечивающий удовлетворение сформулированных требований [134]. Система измерительного контроля состояния многопараметрического объекта, реализующая разработанный способ контроля, имеет структуру, представленную на рисунке 5.9 Система функционирует в соответствии с алгоритмом, представленном на рисунке 5.10.

Для каждого контролируемого параметра ($j = 1 \dots n$) многопараметрического объекта формируются диапазоны (рисунок 5.11):

- допустимых значений путем установления верхних y_{Bj} и нижних y_{Hj} контрольных границ для каждого контролируемого параметра y_j многопараметрического объекта;
- нормальных значений из диапазона допустимых значений путем установления верхней y_{B1j} и нижней y_{H1j} предупредительных границ,
- предельных значений за пределами диапазона допустимых значений путем введения верхней y_{B2j} и нижней y_{H2j} контрольных границ,
- запредельных значений за пределами диапазона предельных значений путем введения верхней y_{B3j} и нижней y_{H3j} предельных границ.

управляющие воздействия

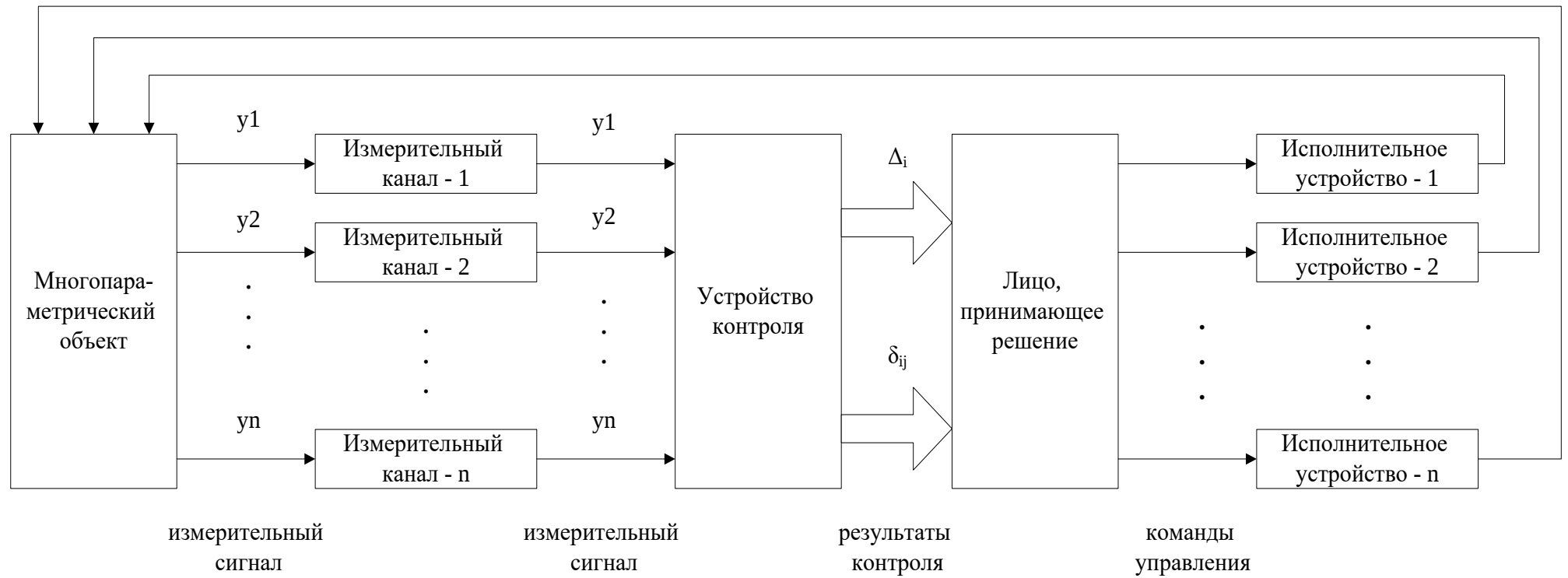


Рисунок 5.9 – Структура системы измерительного контроля многопараметрического объекта

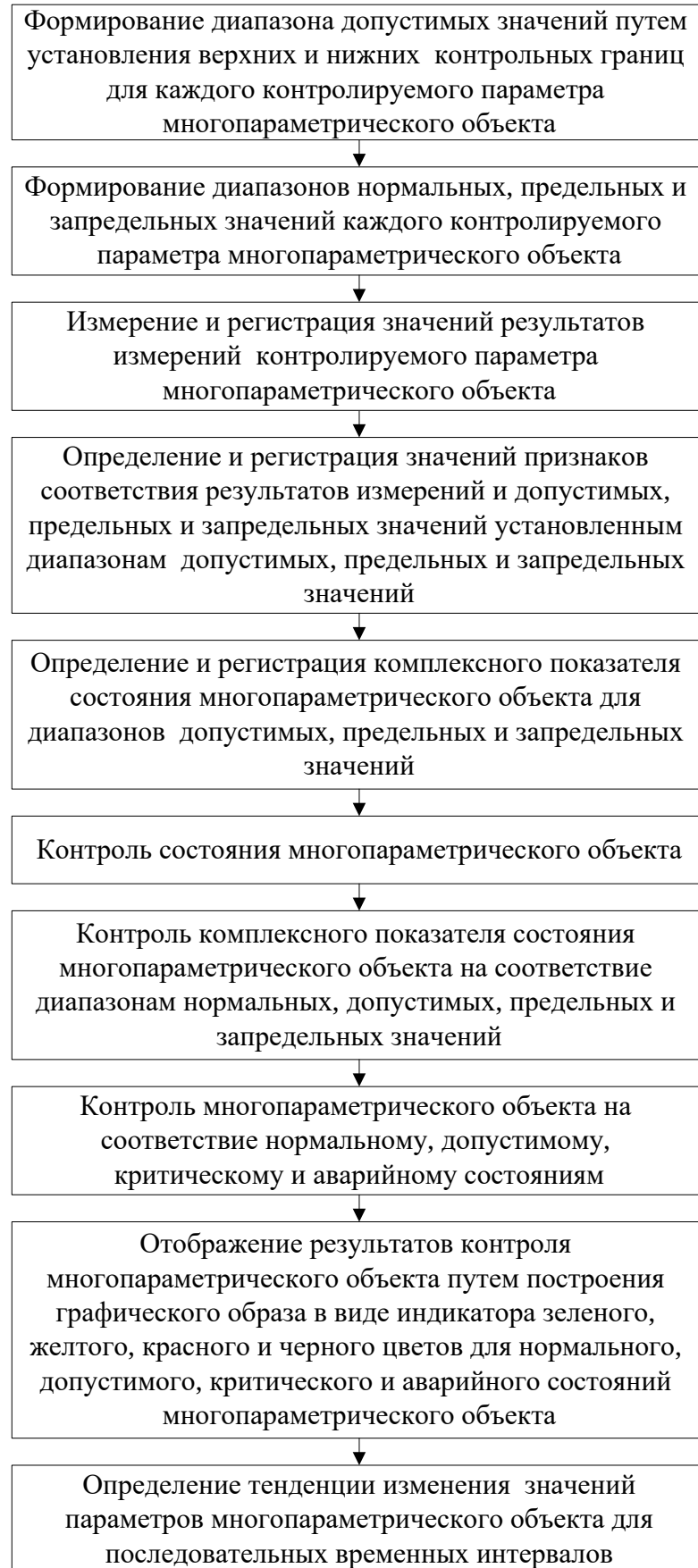


Рисунок 5.10 – Алгоритм функционирования системы измерительного контроля многопараметрического объекта

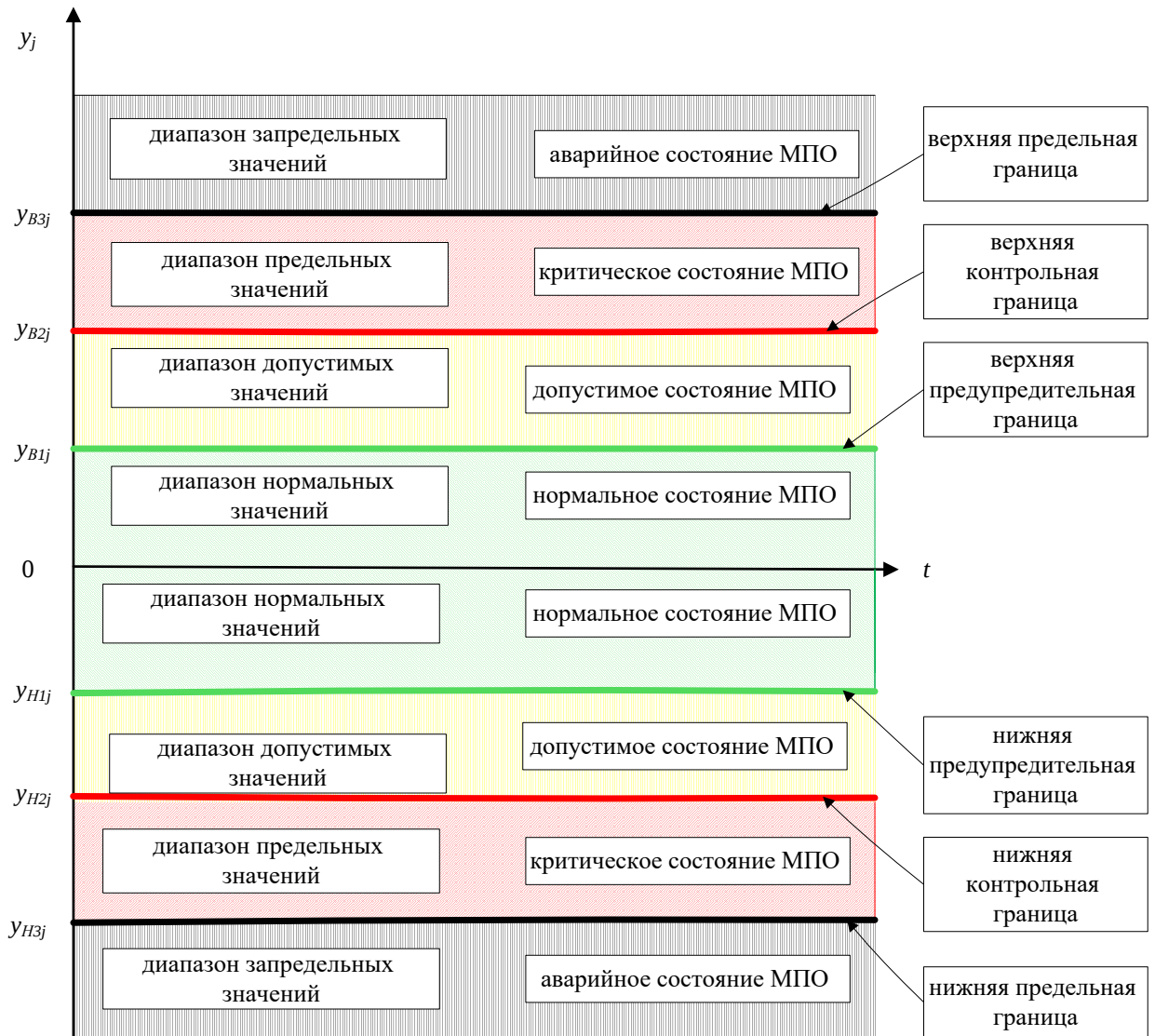


Рисунок 5.11 – Система измерительного контроля с четырьмя возможными состояниями многопараметрического объекта контроля

Средства измерений параметров контролируемого объекта измеряют и регистрируют текущие значения $\hat{y}_j$ контролируемых параметров многопараметрического объекта. По результатам измерений определяют значения признаков соответствия результатов измерений и допустимых, предельных и запредельных значений δ_{ij} установленным диапазонам допустимых, предельных и запредельных значений:

- для диапазона допустимых значений ($i = 1$):

$$\delta_{1j} = \begin{cases} 0, \text{ если } y_{H1j} \leq \hat{y}_j \leq y_{B1j} \\ 1, \text{ если } \hat{y}_j < y_{H2j} \text{ или } \hat{y}_j > y_{B2j} \\ \frac{\hat{y}_j - y_{B1j}}{y_{B2j} - y_{B1j}}, \text{ если } y_{B1j} < \hat{y}_j \leq y_{B2j} \\ \frac{\hat{y}_j - y_{H1j}}{y_{H2j} - y_{H1j}}, \text{ если } y_{H2j} \leq \hat{y}_j < y_{H1j} \end{cases}, \quad (5.10)$$

– для диапазона **предельных** значений ($i = 2$):

$$\delta_{2j} = \begin{cases} 0, \text{ если } y_{H2j} \leq \hat{y}_j \leq y_{B2j} \\ 1, \text{ если } \hat{y}_j < y_{H3j} \text{ или } \hat{y}_j > y_{B3j} \\ \frac{\hat{y}_j - y_{B2j}}{y_{B3j} - y_{B2j}}, \text{ если } y_{B2j} < \hat{y}_j \leq y_{B3j} \\ \frac{\hat{y}_j - y_{H2j}}{y_{H3j} - y_{H2j}}, \text{ если } y_{H3j} \leq \hat{y}_j < y_{H2j} \end{cases}, \quad (5.11)$$

– для диапазона **запредельных** значений ($i = 3$):

$$\delta_{3j} = \begin{cases} 0, \text{ если } y_{H3j} \leq \hat{y}_j \leq y_{B3j} \\ 1, \text{ если } \hat{y}_j < y_{H3j} \text{ или } \hat{y}_j > y_{B3j} \end{cases}, \quad (5.12)$$

где y_{H1j} , y_{B1j} – значения соответственно нижней и верхней предупредительной границы,

y_{H2j} , y_{B2j} – значения соответственно нижней и верхней контрольной границы,

y_{H3j} , y_{B3j} – значения соответственно нижней и верхней предельной границы,

Далее определяют и регистрируют комплексные показатели состояния многопараметрического объекта Δ_i для диапазонов допустимых, предельных и запредельных значений.

Процесс формирования комплексных показателей состояния многопараметрического объекта проиллюстрирован на рисунке 5.12.

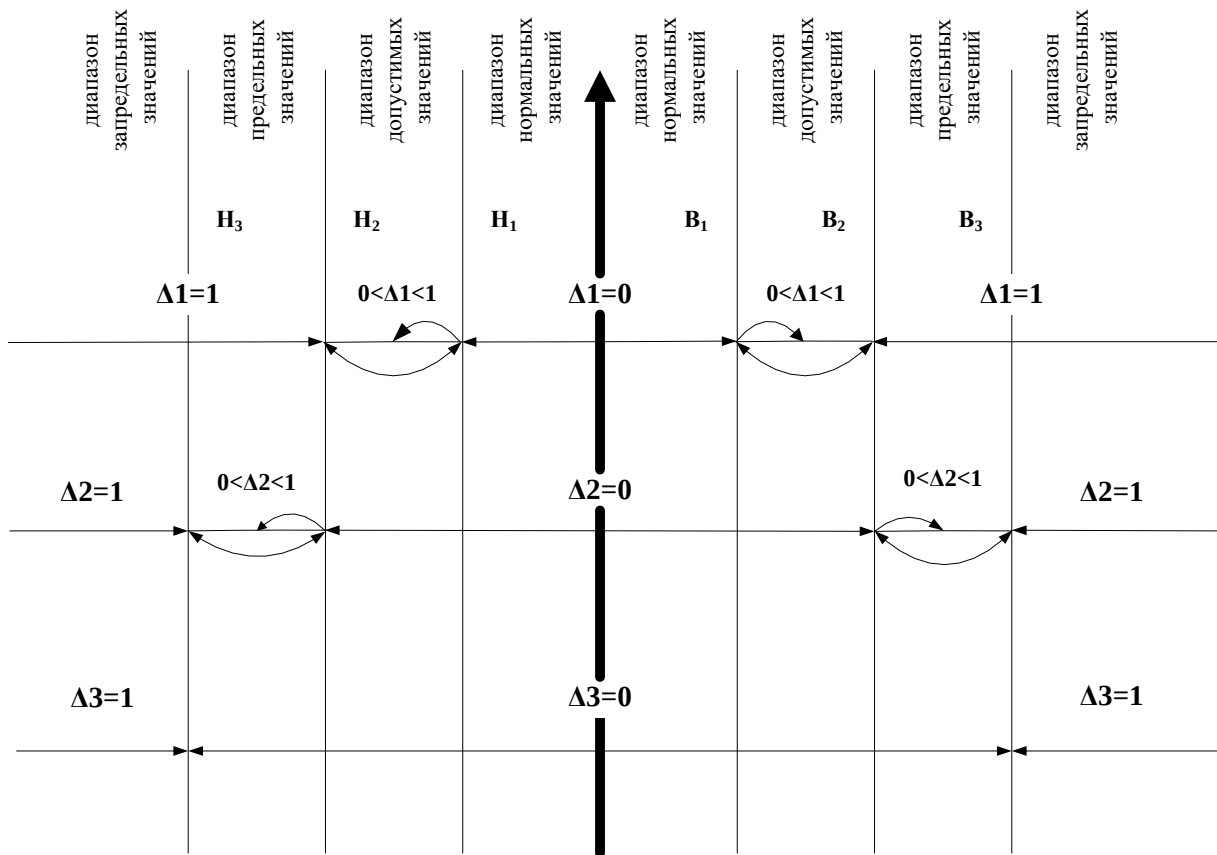


Рисунок 5.12 – Формирование комплексных показателей состояния многопараметрического объекта

Комплексные показатели достаточно давно используют при оценке качества многопараметрического объекта и в традиционном смысле комплексный показатель качества – характеризует совокупность взаимосвязанных свойств (параметров) из всего множества свойств (параметров), образующих качество многопараметрического объекта. Как синоним термина «комплексный показатель качества» используют понятие обобщенный показатель качества – показатель качества, относящийся к такой совокупности свойств (параметров) многопараметрического объекта, по которой принято решение оценивать его качество в целом. Эти термины используют при применении комплексного метода оценки качества многопараметрического объекта, основанного на применении комплексного

(обобщенного) показателя, который представляет собой функцию от единичных показателей (контролируемых параметров). Этот метод применяют в тех случаях, когда наиболее целесообразно оценивать качество многопараметрического объекта только одним значением.

Комплексный (обобщенный) показатель качества многопараметрического объекта должен отвечать нескольким требованиям:

- репрезентативность (представительность) – представленность всех значимых контролируемых параметров многопараметрического объекта, по которым оценивается его качество;
- монотонность – изменение комплексного показателя качества многопараметрического объекта при изменении любого из единичных контролируемых параметров при фиксированных значениях остальных контролируемых параметров;
- критичность (чувствительность) к варьируемым контролируемым параметрам, комплексный показатель должен согласованно реагировать на изменение каждого из контролируемых параметров;
- сравниваемость – сопоставимость результатов комплексной оценки качества, т.е. показатель должен быть выражен в безразмерных величинах.

Применение комплексного метода оценки качества многопараметрического объекта связано со следующими проблемами:

- составление перечня контролируемых параметров, наиболее полно отражающих качество многопараметрического объекта;
- определение комплексного показателя качества, учитывающего все выбранные контролируемые параметры и их размерности;
- установление функциональной зависимости комплексного показателя качества и контролируемых параметров.

Описанные проблемы в рамках предлагаемого способа комплексного контроля состояния многопараметрического объекта по разнородной информации решаются следующим образом.

Составление перечня контролируемых параметров, наиболее полно отражающих качество многопараметрического объекта, выполняется экспертами, на основе глубокого изучения требований нормативно-технической и/или конструкторской (проектной) документации.

Значения комплексных показателей состояния многопараметрического объекта Δ_i для диапазонов допустимых, предельных и запредельных значений определяются следующим образом:

комплексный показатель состояния многопараметрического объекта для диапазона допустимых значений ($i = 1$):

$$\Delta_1 = \sqrt{\sum_{j=1}^n \delta_{1j}^2}, \quad (5.13)$$

– комплексный показатель состояния многопараметрического объекта для диапазона предельных значений ($i = 2$):

$$\Delta_2 = \sqrt{\sum_{j=1}^n \delta_{2j}^2}, \quad (5.14)$$

– комплексный показатель состояния многопараметрического объекта для диапазона запредельных значений ($i = 3$):

$$\Delta_3 = \sqrt{\sum_{j=1}^n \delta_{3j}^2}. \quad (5.15)$$

Затем проводится собственно измерительный контроль состояния объекта посредством определения признаков соответствия результатов измерений и допустимых, предельных и запредельных значений δ_{ij} установленным диапазонам допустимых, предельных и запредельных значений.

Также контролируют комплексные показатели состояния многопараметрического объекта на соответствие диапазонам нормальных, допустимых, предельных и запредельных значений следующим образом :

- если комплексный показатель состояния многопараметрического объекта для диапазона допустимых значений равен нулю, то значения всех параметров объекта находятся в пределах диапазона нормальных значений,
- если комплексный показатель состояния многопараметрического объекта для диапазона допустимых значений больше нуля, то значения не менее чем одного параметра многопараметрического объекта находятся за пределами диапазона нормальных значений,
- если комплексный показатель состояния многопараметрического объекта для диапазона предельных значений равен нулю, то все параметры многопараметрического объекта находятся в пределах диапазона нормальных или допустимых значений,
- если комплексный показатель состояния многопараметрического объекта для диапазона предельных значений больше нуля, то значения не менее чем одного параметра многопараметрического объекта находятся за пределами диапазона допустимых значений,
- если комплексный показатель состояния многопараметрического объекта для диапазона запредельных значений равен нулю, то все параметры многопараметрического объекта находятся в пределах диапазона нормальных, допустимых или предельных значений,
- если комплексный показатель состояния многопараметрического объекта для диапазона запредельных значений больше нуля, то значения не менее чем одного параметра многопараметрического объекта находятся за пределами диапазона предельных значений.

Формирование матрицы состояний позволяет отнести текущее состояние объекта к одному из четырёх возможных его состояний: нормальному, допустимому, критическому и аварийному состояниям.

Анализ значений комплексного показателя состояния многопараметрического объекта по окончании интервала времени позволяет сформировать результат контроля путем отнесения текущего состояния

многопараметрического объекта к одному из качественно различных возможных состояний:

– нормальное состояние (значения всех контролируемых параметров многопараметрического объекта находятся в диапазоне нормальных значений), комплексный показатель состояния многопараметрического объекта для диапазона допустимых значений $\Delta_1 = 0$, комплексный показатель состояния многопараметрического объекта для контрольных границ $\Delta_2 = 0$, комплексный показатель состояния многопараметрического объекта для диапазона запредельных значений $\Delta_3 = 0$;

– допустимое состояние (не менее одного значения из контролируемых параметров многопараметрического объекта находится в диапазоне допустимых значений), комплексный показатель состояния многопараметрического объекта для диапазона допустимых значений $\Delta_1 > 0$, комплексный показатель состояния многопараметрического объекта для диапазона предельных значений $\Delta_2 = 0$, комплексный показатель состояния многопараметрического объекта для диапазона запредельных значений $\Delta_3 = 0$;

- критическое состояние (не менее одного значения из контролируемых параметров многопараметрического объекта находится в диапазоне предельных значений), комплексный показатель состояния многопараметрического объекта для диапазона допустимых значений $\Delta_1 > 0$, комплексный показатель состояния многопараметрического объекта для диапазона предельных значений $\Delta_2 > 0$, комплексный показатель состояния многопараметрического объекта для диапазона запредельных значений $\Delta_3 = 0$;

- аварийное состояние (не менее одного значения из контролируемых параметров многопараметрического объекта находится в диапазоне запредельных значений), комплексный показатель состояния многопараметрического объекта для диапазона допустимых значений $\Delta_1 > 0$, комплексный показатель состояния многопараметрического объекта для диапазона предельных значений $\Delta_2 > 0$, комплексный показатель состояния

многопараметрического объекта для диапазона запердельных значений $\Delta_3 > 0$.

Если комплексные показатели состояния многопараметрического объекта для диапазонов допустимых, предельных и запердельных значений равны нулю, то состояние объекта является нормальным.

Если комплексные показатели состояния многопараметрического объекта для диапазона допустимых значений больше нуля, комплексные показатели состояния многопараметрического объекта для диапазона предельных и запердельных значений равны нулю, то состояние многопараметрического объекта является допустимым.

Если комплексные показатели состояния многопараметрического объекта для диапазона допустимых и предельных значений больше нуля, комплексные показатели состояния многопараметрического объекта для диапазонов запердельных значений равны нулю, то состояние многопараметрического объекта является критическим.

Если комплексные показатели состояния многопараметрического объекта для диапазонов допустимых, предельных и запердельных значений больше нуля, то состояние объекта является аварийным.

При автоматизированном управлении процессом результаты измерительного контроля могут отображаться в удобной для оператора – лица, принимающего решение, визуальной форме в виде диаграмм комплексных показателей состояния многопараметрического объекта в течение соответствующих интервалов времени. Диаграммы позволяют оператору быстро определять, в каком из четырёх возможных состояний (нормальное, допустимое, критическое, аварийное) находится многопараметрический объект в данный момент времени.

Пример процесса контроля многопараметрического объекта разработан системой измерительного контроля. Объект контроля описывается четырьмя параметрами ($n = 4$). Для каждого из параметров установлены границы

диапазонов, значения которых приведены в таблице 5.3 (без указания единиц измерения).

Таблица 5.3 – Границы диапазонов контролируемых параметров

Границы	Нижняя			Верхняя		
	предельная	контрольная	предупредительная	предупредительная	контрольная	предельная
1-го параметра	2	6	10	20	30	40
2-го параметра	0	0	0	200	400	800
3-го параметра	0	2	4	10	10	10
4-го параметра	-20	-10	-5	5	10	20

Результаты измерений контролируемых параметров по окончании 12 временных интервалов ($k = 1 \dots 12$), которые приведены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Результаты измерений контролируемых параметров по окончании 12 временных интервалов

Результаты измерений	Номер временного интервала											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1-го параметра	18	22	12	8	6	10	20	25	33	38	42	44
2-го параметра	50	100	150	280	350	450	350	250	200	150	100	100
3-го параметра	6	6	5	5	4	4	3,5	2,5	1,5	1	0	-1
4-го параметра	4	3	2	1	0	-1	-3	-5	-6	-7,5	-9	-12

По данным табл. 5.4 в соответствии с формулами (5.10 – 5.12) определяются значения показателей соответствия δ_{ij} контролируемых параметров ($j=1 \dots 4$) установленным диапазонам допустимых ($i=1$), предельных ($i=2$) и запределных ($i=3$) значений (табл. 5.5–5.8).

Таблица 5.6 – Показатели соответствия 2-го контролируемых параметров установленным диапазонам допустимых, предельных и запредельных значений

Таблица 5.7 – Показатели соответствия 3-го контролируемых параметров установленным диапазонам допустимых, предельных и запредельных значений

[illegible]

Таблица 5.8 – Показатели соответствия 4-го контролируемых параметров установленным диапазонам допустимых, предельных и запредельных значений

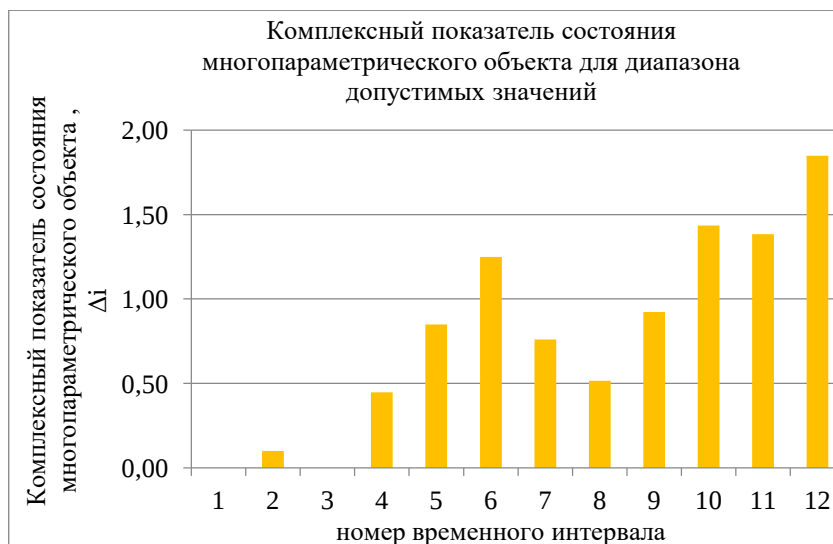
Показатель соответствия 4-го контролируемого параметра	Номер временного интервала											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
для диапазона допустимых значений δ_{14}	0	0	0	0	0	0	0	0	0,2	0,5	0,8	1
для диапазона предельных значений δ_{24}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,2
для диапазона запредельных значений δ_{34}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

В таблице 5.9 приведены значения комплексных показателей состояния многопараметрического объекта для допустимых, предельных и запредельных диапазонов значений четырех контролируемых параметров многопараметрического объекта, определенных по формулам (5.13–5.15).

Таблица 5.9 – Значения комплексных показателей состояния многопараметрического объекта

Комплексный показатель состояния многопараметрического объекта	Номер временного интервала											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
для диапазона допустимых значений	0	0,2	0	0,64	1,25	1	0,79	0,94	1,43	1,5	1,62	1,73
для диапазона предельных значений	0	0	0	0	0	0,15	0	0	0,39	0,94	1,41	1,43
для диапазона запредельных значений	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1,41

На рисунке 5.13 приведены диаграммы комплексных показателей состояния многопараметрического объекта для 12 временных интервалов.



а)



б)



в)

Рисунок 5.13 Диаграммы комплексных показателей состояния многопараметрического объекта для 12 временных интервалов

В таблице 5.10 показаны качественные состояния многопараметрического объекта для 12-и интервалов времени.

Таблица 5.10 – Качественные состояния многопараметрического объекта для 12-и интервалов времени

Состояние многопара метрическо го объекта	Номер временного интервала											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	норм.	допустимое	норм.	допустимое	допустимое	предельное	допустимое	допустимое	предельное	предельное	аварийное	аварийное

В случае, когда какой-либо комплексный показатель состояния многопараметрического объекта не равен нулю, проводится анализ показателей соответствия δ_{ij} для выявления контролируемого параметра, значение которого вышло за пределы диапазона нормальных значений. Результаты для 12 интервалов времени приведены в таблице 5.11.

Таблица 5.11 – Значения комплексного показателя для 12 интервалов времени

Номер временного интервала												Номер контролируемого параметра, значение которого принадлежит
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
	1		1,2	1,2		2,3	1,2,3	4	4	4		диапазону допустимых значений
					2			1,3	1,3	3	4	диапазону предельных значений
										1	1,3	диапазону запредельных значений

На основании полученных данных принимается управленческое решение, соответствующее установленным требованиям к контролируемому объекту. Например, при повторяющихся значениях параметра, принадлежащих

диапазону предельных значений, следует проверить состояние элемента, параметр которого вышел за пределы диапазона допустимых значений, с целью его отладки, ремонта или своевременной замены. В случае выхода значения контролируемого параметра за пределы диапазона предельных значений, приводящее к аварийному состоянию объекта, следует изъять изделие из производственного процесса или остановить его для восстановления исправного состояния.

Комплексный измерительный контроль состояния многопараметрического объекта по разнородной информации характеризуется тем, что для повышения оперативности и достоверности контроля многопараметрических объектов (динамических систем, процессов):

- вводятся для каждого контролируемого параметра дополнительные границы, устанавливаемые в пределах диапазонов допустимых и предельных значений,

- определяется комплексный показатель состояния многопараметрического объекта, показывающий, в каком состоянии (нормальное, допустимое, критическое, аварийное) находится объект в данный момент времени.

Выполнение этих действий приводит к повышению оперативности принятия управленческого решения и реализации управляющего воздействия.

Таким образом, совокупность существенных признаков предлагаемого способа комплексного контроля состояния многопараметрического объекта по разнородной информации формирует новые свойства контрольно-измерительной системы, заключающиеся в том, что:

- вводятся дополнительные границы, устанавливаемые в пределах диапазонов допустимых и предельных значений для каждого контролируемого параметра многопараметрического объекта,

- определяется комплексный показатель состояния многопараметрического объекта, показывающий, какой контролируемый параметр вышел за пределы диапазона нормальных значений.- повышается

оперативность и достоверность контроля многопараметрического объекта (динамических система, процесс).

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 5

1 Разработан унифицированный канал измерения составляющих комплексного сопротивления объекта и напряжения на нем для использования в составе информационно-измерительных систем для измерений параметров комплексного сопротивления и определения вольт – амперных и спектральных характеристик составляющих комплексного сопротивления и управляющих систем для активного многопараметрического измерительного контроля гетерогенных объектов в рабочих режимах. Канал обеспечивает формирование выбранного варианта из базы измерительных схем и питание измерительной схемы как от собственного источника синусоидального напряжения, так и от внешнего источника, в том числе, с ненормированными метрологическими характеристиками.

2 Унификацию АЦП всех измерительных каналов ИИС для измерений параметров комплексного сопротивления гетерогенных объектов в рабочих режимах предложено осуществлять на основе реализации нового способа аналого-цифрового преобразования напряжения. Разработанный способ аналого-цифрового преобразования напряжения обладает следующими преимуществами по сравнению с параллельным аналого-цифровым преобразованием:

– в каждый момент равенства преобразуемого напряжения одному из уровней опорного напряжения производится отражающее это равенство изменение значения кода результата преобразования, что минимизирует динамическую погрешность, имеющую место при параллельном аналого-цифровом преобразовании, где регистрация результатов сравнения преобразуемого напряжения с уровнями опорного напряжения производится периодически независимо от изменений преобразуемого напряжения;

— исключена возможность потери информации о изменении преобразуемого напряжения на величину, превышающую разность между уровнями опорного напряжения в течение интервала времени, длительность которого превышает период опорной частоты.

3 Предложен способ пооперационного активного многопараметрического измерительного контроля гетерогенного объекта в ходе производственного процесса. Разработаны структура и алгоритм функционирования системы измерительного контроля многопараметрических объектов, отличающийся установлением предупредительных, контрольных и предельных границ в диапазоне изменения каждого контролируемого параметра и вычислением комплексных показателей состояния для каждого поддиапазона на основе результатов измерений всех параметров, что позволяет достоверно отнести текущее состояние процесса к нормальному, допустимому, критическому или аварийному состоянию и на этой основе эффективно корректировать ход производственного процесса для придания изделию целевых функциональных свойств.

ГЛАВА 6

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШЕГО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ КОМПЛЕКСНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

В настоящее время совершенствование средств измерений физических величин, в том числе, средств измерений ПКС идет в направлении разработки интеллектуальных средств измерений. Проектирование интеллектуальных средств измерений как практическая инженерная деятельность может эффективно осуществляться только на надежной теоретической основе. Интеллектуализация измерений представляет собой междисциплинарную научную проблему, требующую для своего решения привлечения всей системы научного знания.

Метрология в традиционной системе научных дисциплин рассматривается как прикладная точная наука, непосредственно взаимодействующая с практикой измерений в ходе производственной и научной деятельности [135, 136]. Верхний для теории измерений физических величин уровень в системе наук образуют философия, физика, математика. В прошлом веке в эту надсистему научных знаний вошла системология как наука междисциплинарного общения [137]. Системологии принадлежит главная роль в формировании усложненной системы научных дисциплин, возникновение которой обусловлено стремительным развитием информационных технологий во второй половине прошлого века. В подсистеме информационных наук метрология выступает в новой для себя роли фундаментальной системы знания [138]. Это определяет необходимость систематизации внешних связей теоретической базы интеллектуальных измерений в системе научного знания. В связи с этим в данной главе рассмотрены философские, физические и системологические основы проектирования средств измерений со слабым искусственным интеллектом.

Комплексная автоматизация и последующая интеллектуализация производственных процессов сопровождается созданием информационной сферы, одной из составляющих которой является измерительная информация. Развитие измерительной техники определяется не только задачами, возникающими в метрологии при обеспечении единства измерений и метрологического обеспечения проектирования и производства промышленной продукции, но необходимостью организации эффективного взаимодействия с другими информационными компонентами интеллектуальных информационных систем.

Интеллектуальное средство измерений реализует информационную связь физической реальности и искусственного интеллекта, который обменивается результатами своей деятельности с естественным интеллектом, конечным потребителем измерительной информации. При организации обоих взаимодействий возникают сложные научные проблемы, которые требуют своего решения для успешной разработки интеллектуальных средств измерений [139–141].

Результаты исследований, представленные в данной главе, опубликованы в работах [142–149]

6.1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Теоретические основы проектирования интеллектуальных средств измерений в силу специфичности возникающих проблем можно рассматривать как частную научную теорию в составе метрологии.

Современная философия науки выделяет два подхода к формированию частной естественно-научной теории: аксиоматический и конструктивный [150].

В рамках аксиоматического подхода научная теория рассматривается как гипотетико-дедуктивная система. Высший уровень теоретических знаний образует совокупность аксиом, исходных положений, принимаемых без доказательства. Развертывание теории есть процесс логического вывода из аксиом теоретических следствий. Из утверждений верхних уровней иерархической системы знания теории выводятся высказывания нижних уровней. Самый нижний уровень системы составляют положения, которые можно проверить экспериментально.

Конструктивный подход основан на синтезе алгоритмов формирования базисных объектов теории. Термин "конструктивное введение объекта в теорию" был предложен В.С. Степиным как характеристика процедур построения физической теории по аналогии с идеями конструктивной математики, где объект полагается корректно введенным, если дан алгоритм его построения. Генерация нового теоретического знания осуществляется в результате познавательного цикла, который предполагает движение от обоснованных опытом картин исследуемой реальности к гипотетическим моделям, их адаптацию и их возможную трансформацию в этом процессе к эмпирическому материалу, а затем новое сопоставление уже обоснованных опытом моделей с картиной реальности. Развитие научных понятий и представлений осуществляется многократным повторением описанного цикла. Конструктивность выступает в качестве методологического правила построения ядра научной теории. Правило конструктивности не просто констатирует необходимость эмпирического обоснования теории, а указывает, каким образом осуществляется такое обоснование.

Современная концепция построения частной естественно – научной теории предполагает совместное использование аксиоматического и конструктивного подходов, что при построении теории автоматических физических измерений отражает отмеченную В.А. Грановским двойственность метрологии, в рамках которой решаются как задачи теории измерений, так и

практические задачи реальных измерений физических величин с использованием средств измерений [138].

Измерение представляет собой форму познания. В аксиоматической форме процесс познания представлен Г. Фоллмером в виде ряда постулатов-аксиом [151], которые представляются справедливыми для искусственного интеллекта.

Постулат реальности. Имеется реальный мир, независимый от восприятия и сознания. Гипотеза о существовании внешнего мира принимается в качестве аксиомы познания, исходя из того, что для признания всех высказываний субъективными также нет никаких доказательств.

Постулат структурности. Реальный мир структурирован. Постулат придает аксиоматический характер убеждению, что универсум подчиняется никогда не разрушаемому единству не противоречащих друг другу естественных законов. В качестве структур рассматриваются симметрии, инвариантности, топологические и метрические объекты, взаимодействия, естественные законы, индивиды, системы. Познающий субъект также принадлежит реальному миру и имеет определенную структуру. Разделение на сознание и внешний мир производится для исследования познавательного процесса.

Постулат непрерывности. Между всеми областями действительности существует непрерывная связь. Если иметь в виду кванты действия, элементарные частицы, мутационные скачки, то точнее говорить о квазинепрерывности.

Постулат о чужом сознании. Также и другие индивиды (люди и животные) имеют чувственные впечатления и сознание. Предположение о другом переживающем человеческом субъекте есть неизбежный мыслительный ход, в подлинном смысле априорная необходимость мышления и созерцания.

Постулат взаимодействия. Наши чувственные органы аффицируются реальным миром. Физическое тело познающего субъекта обменивается энергией с окружением. Некоторые из изменений в чувствительных клетках обрабатываются как сигналы в нервной системе и в мозге. Они становятся

воспринимаемыми, интерпретируются как информация о внешнем мире и осознаются.

Постулат функции мозга. Мышление и сознание являются функциями мозга, естественного органа. Все явления сознания связаны с физиологическими процессами в мозге (психологическая аксиома). Сознание есть последний и высший орган, которые развили живые существа и который предоставляет им дополнительную подробную информацию об их собственных внутренних состояниях и их возможностях.

По Гегелю «мышление, порождающее конечные определения и движущееся в них, называется рассудком». «...Определения рассудка принадлежат области конечного и ... движущееся в их пределах познание не достигнет истины» [152]. Таким образом, можно говорить о рассудочном мышлении как о высшей достижимой для искусственного (компьютерного) интеллекта на современном этапе его развития форме мышления. Содержанием искусственного рассудочного мышления при выполнении измерений и обработке их результатов являются арифметические операции над рациональными числами и логические операции.

Рассудочное мышление искусственного интеллекта, реализуемое компьютерной программой, должно быть освобождено от необходимости разрешения в процессе функционирования диалектических противоречий. Дуализм описания физической картины мира (аналоговое – дискретное, волновое – корпускулярное) должен быть снят в пользу одного из способов описания и зафиксировано в картине мира интеллектуальной технической системы.

Поскольку понимание бесконечного доступно исключительно человеческому мышлению, оно не может использоваться в качестве понятия теории проектирования интеллектуальных средств измерений. В связи с этим построение теории должно проводиться путем признания понятия «бесконечность» абстрактным объектом, который должен быть выведен за границы теории. Это осуществляется посредством элиминации базовых

понятий и исходных положений, определяемых с использованием в явном и скрытом виде понятия «бесконечность» или трансформации их в конечную форму путем установления соответствующих границ.

6.2 ИСХОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

В первую очередь, интеллектуализация измерений требует распространения «измерительного дела» [138] в формах установления единства измерений и применения методов достижения их требуемой точности на область компьютерной обработки измерительной информации. Одновременно должен иметь место встречный процесс распространения «вычислительного дела» в форме алгоритмизации процессов измерения, обработки и использования измерительной информации. Таким образом, можно говорить о коэволюции средства измерений и компьютера как подпроцессе эволюции автоматических технических интеллектуальных информационно-измерительных и управляющих технических систем к интеллектуальным техническим системам.

Для решения задачи проектирования интеллектуальных средств измерений метрологии необходимо выйти за собственные границы, включив в сферу научных знаний, необходимых для проектирования средств измерений, знания базовых (философия, физика, математика) и смежных с ней наук. Системный подход выступает как общий метод организации взаимодействия различных отраслей научного знания при построении научной теории [142].

Базисными абстрактными объектами теории измерений следует считать понятия «истина», «качество», «количество», «мера». По Гегелю содержание и связи этих понятий определяются следующими положениями [152]: «Истина ... должна быть определена ... как единство бесконечного и конечного... Бытие ... содержит в себе три ступени: качество, количество и меру. Качество

есть...тождественная с бытием определенность, так что нечто перестает быть тем, что оно есть, когда оно теряет свое качество. Количество есть, напротив, внешняя бытию безразличная для него определенность...Мера есть единство первых двух, качественно определенное количество. Все вещи имеют свою меру, т.е. количественную определенность, и для них безразлично, будут они более или менее велики; но вместе с тем это безразличие также имеет свой предел, при нарушении которого (при дальнейшем увеличении или уменьшении) вещи перестают быть тем, чем они были... Число есть мысль как некое совершенно внешнее самому себе бытие,... оно есть мысль, имеющая своим определением внешнее созерцание».

При рассмотрении измерения на основе приведенных положений, прежде всего, необходимо отметить трансформацию понятия «качество». Поскольку при выходе за пределы меры данное качество исчезает, переходит в другое, по Гегелю «качество есть по существу лишь категория конечного, которая поэтому и находит свое подлинное место лишь в царстве природы, а не в мире духа». Измерение имеет смысл только при неизменности качества, ненарушении границ меры. Поэтому в пределах теории физических измерений качество не имеет границ перехода в иное качество и должно рассматриваться как категория бесконечного.

Категория «мера» трансформируется в теории измерений в понятие «диапазон изменения измеряемой величины», для которого обязательно установление минимального и максимального значений величины. «Освободившимся» термином «мера» в метрологии обозначается не абстрактный, а реальный объект – «средство измерений, которое воспроизводит в процессе использования или постоянно хранит величины одного или более данных родов, с приписанными им значениями», согласно РМГ 29 – 2013 «Метрология. Основные термины и определения».

Как указывает Гегель, согласно Канту, мышление по самой своей природе впадает в противоречия (антиномии), когда оно хочет познать бесконечное. Первая антиномия Канта: должны мы мыслить мир ограниченным или неограниченным в пространстве и во времени. Вторая антиномия: должны ли

мы рассматривать материю как состоящую из атомов или как делимую до бесконечности».

Управление технической системой не может быть основано на алгоритмически неразрешимых противоречиях диалектического мышления. При системном подходе физический мир представляется в виде ограниченной системы конечного числа подсистем, образованных материей, делимой не до бесконечно малых, а до далее неделимых конечных элементов («атомов»). Снятие диалектических противоречий при решении задачи интеллектуализации измерений возможно путем исключения из базиса теории проектирования интеллектуальных средств измерений абстрактных объектов, основанных на категории бесконечного, или конструктивным введением в содержание базисных понятий ограничений, трансформирующих бесконечные объекты в конечные. Данное правило отбора и трансформации базисных абстрактных объектов теории проектирования интеллектуальных средств измерений, принцип конечности, представляется фундаментальным.

При формировании понятийного базиса на основе принципа конечности мышление оперирует только конечными объектами и порождает суждения, содержащие только такие объекты. По Гегелю «мышление, порождающее конечные определения и движущееся в них, называется рассудком». Таким образом, можно говорить о рассудочном мышлении как о высшей достижимой для искусственного интеллекта форме мышления. Содержанием искусственного рассудочного мышления в процессе автоматического измерения являются логические операции над конечными абстрактными объектами и математические операции над конечными числами, результатом которых являются конечные числа.

Теория измерений физических величин базируется на системе аксиом, устанавливающих взаимосвязь ее основных понятий. Суть системного подхода к аксиоматике частной теории состоит в представлении об аксиомах как об исходных положениях, составленных не только из терминов, узаконенных для понятий, сформированных внутри теории, но и терминов, заимствованных из

областей научных знаний более высоких (философия, физика, математика) и равных (информатика) метрологии иерархических уровней системы научного знания. При этом необходимо учитывать, что перенос термина в другую область сопровождается изменением содержания понятия, обозначаемого данным термином, в процессе взаимодействия с новыми окружающими элементами научного знания.

В метрологической литературе предлагаются различные варианты аксиом теории измерений:

1. Селиванов М.Н. [153]:

1.1 Измерение возможно при условии установления качественной определенности свойства, позволяющей отличить его от других свойств.

1.2 Измерение возможно при условии установления единицы для измерения величины.

1.3 Измерение возможно при условии материализации единицы измерения техническим средством.

1.4 Измерение возможно при условии сохранения неизменным во время измерения размера единицы измерения.

2. Грановский В.А. [154]:

2.1 В рамках принятой модели объекта исследования существует определенная измеряемая величина и её истинное значение.

Следствие. Для данной физической величины объекта исследований существует множество измеряемых величин и их истинных значений.

2.2 Измеряемая величина постоянна.

2.3 Для измерений при переменной физической величине необходимо определить ее постоянный параметр (измеряемую величину)

2.4 Существует несоответствие измеряемой величины исследуемому свойству объекта.

2.5 Истинное значение величины отыскать невозможно.

2.6 Достижимая точность измерения определяется априорной информацией об объекте исследования.

3. Шишкин И.Ф. [155]:

3.1 Без априорной информации измерение невозможно.

3.2 Измерение суть сравнение размеров опытным путем.

3.3 Результат измерения без округления является случайным.

Следствие. Результат измерения не имеет конкретного значения.

4. Сергеев А.Г., Крохин В.В. [156]:

4.1 Истинное значение измеряемой величины существует, и оно постоянно.

4.2 Истинное значение измеряемой величины отыскать невозможно.

5. Тарбеев Ю. В.И др. [157]:

5.1 В рамках принятой модели объекта исследования существует определенная измеряемая физическая величина и ее истинное значение.

Следствие. Для данной физической величины объекта измерения существует множество измеряемых величин.

5.2 Истинное значение измеряемой величины постоянно.

Следствие. Для измерения переменной физической величины необходимо определить ее постоянный параметр – измеряемую величину.

5.3 Существует несоответствие измеряемой величины исследуемому свойству объекта.

Следствие 1. Истинное значение измеряемой величины отыскать невозможно

Следствие 2. Достижимая точность измерения определяется априорной информацией об объекте измерения.

5.4 Измерение возможно, если возможно выделение данной величины среди других величин.

5.5 Измерение возможно, если возможно установление единицы измерений выделенной величины.

5.6 Измерение возможно при создании технического средства, воспроизводящего установленную единицу измерений и хранящего ее размер (меру).

5.7 Измерение возможно при сохранении неизменным размера единицы (меры) в пределах установленной погрешности как минимум на срок, необходимый для одного измерения или одной серии измерений.

6. Цветков Э.И. [158]:

6.1 Величина измерима, если существует действительное число, представляющее отношение величины к принятой единице измерений.

6.2 Процедура измерений, обеспечивающая установление истинного значения измеряемой величины, реализована быть не может.

7. Свириденко В.М. [159]:

7.1 Существует истинное значение измеряемой величины.

7.2 Истинное значение измеряемой величины отыскать невозможно.

8. Пиотровский Я. [160]:

8.1 Между состояниями данной характеристики и между значениями соответствующих величин существует отношение изоморфности.

8.2 Отображение состояния данной характеристики в образ состояния неоднозначно.

8.3 Неоднозначность отображения состояния в образ состояния, реализованного с помощью измерительного средства, можно установить на основе математической модели, описывающей метрологические качества этого средства.

8.4 Сформулированный образ действительности соотносится с некоторыми условно установленными состояниями.

9. Балалаев В.А., Слаев В.А., Синяков А.И. [161]:

9.1 Все реальные физические системы имеют конечную протяженность, как в пространстве, так и во времени.

9.2 Измерение требует наличия определенной (конечной) априорной информации о компонентах измерения.

10. Мурашкина Т.И. [162]:

10.1 Измерение возможно только при качественной определенности свойства объекта, позволяющей отличить его от других свойств, т.е. при выделении измеряемой величины.

10.2 Измерение возможно при условии установления единицы, необходимой для количественной градации величины.

11. Крысин Ю.М. [163]:

11.1 Измерение возможно только при наличии некоторой априорной информации о свойствах измеряемых объектов, явлений или вещества, которые можно выделить качественно и определить количественно.

11.2 Измеряемая величина должна быть определена достаточно подробно, чтобы любая неопределенность, обусловленная неполнотой ее определения, была пренебрежимо малой по сравнению с требуемой точностью измерений.

11.3 Существует несоответствие измеряемой величины исследуемому свойству объекта, определяемое неопределенностью измерения.

11.4 Измерение есть процесс сравнения, поэтому возможно только при условии установления и воспроизведения единицы сравнения.

11.5 Процесс измерения возможен при условии некоторого развивающегося во времени взаимодействия объекта измерения и средства измерений.

При системном подходе аксиоматика теории измерений представляет собой иерархическую систему знаний. Система имеет философский, системно – физический, метрологический и проектировочный (исходные положения проектирования средств измерений) уровни. Приведенные аксиомы могут быть отнесены к одному из иерархических уровней системы за исключением философского уровня. При объединении повторяющихся и близких положений нижние уровни системы аксиом теории измерений приобретают следующий вид.

1 Системно – физический уровень.

1.1 Все реальные физические системы имеют конечную протяженность, как в пространстве, так и во времени.

1.2 Измерение возможно при установлении качественной определенности свойства, позволяющей отличить его от других свойств.

1.3 Существует несоответствие измеряемой величины исследуемому свойству объекта.

2 Метрологический уровень.

2.1 В рамках принятой модели объекта исследования существует определенная измеряемая величина и её истинное значение.

2.2 Истинное значение измеряемой величины постоянно.

2.3 Истинное значение измеряемой величины отыскать невозможно.

2.4 Измерение возможно при наличии качественной и количественной априорной информации о свойствах объекта измерения.

2.5 Измерение возможно при установлении единицы измерения величины.

2.6 Измерение возможно при сохранении неизменным во время измерения размера единицы измерения.

2.7 Измерение есть сравнение размеров опытным путем.

2.8 Величина измерима, если существует действительное число, представляющее отношение величины к принятой единице измерения.

2.9 Результат измерения без округления является случайным.

3 Проектировочный уровень

3.1 Измерение возможно при условии развивающегося во времени взаимодействия объекта измерения и средства измерений.

3.2 Измерение возможно при создании технического средства (меры), воспроизводящего установленную единицу измерения и хранящего ее размер.

В соответствии с принципом конечности аксиома 2.8 не может быть напрямую включена в состав аксиоматики автоматических измерений без введения ограничений, так как множество действительных чисел является бесконечно плотным и содержит бесконечные элементы. На основе принципа конечности результатом измерения следует считать рациональное число в форме отношения целого и натурального чисел без перехода к десятичной

дроби, причем установлены максимальный модуль целого числа и максимальное натуральное число.

Округление является операцией, вызывающей необратимую потерю измерительной информации, увеличивающей ее неопределенность. Принятие положения о конечности делимости (дискретном характере) всех измеряемых величин позволяет исключить понятие «округление» из перечня базисных абстрактных понятий теории автоматических измерений. При этом аксиома 2.9 трансформируется в аксиому «Результат измерения является случайным».

Предлагается возможный вариант иерархической системы аксиом теории автоматических измерений физических величин, выступающей как теоретическая основа проектирования автоматических средств измерений. Философский уровень сформирован из положений философских систем Гегеля и Г. Фоллмера и аксиомы Архимеда [164]. Аксиомы нижнего уровня устанавливают соответствия между абстрактными объектами более высоких уровней и реальными объектами, задействованными в процессе измерения физической величины.

1 Философский уровень

Истина есть единство бесконечного и конечного [152].

Имеется реальный мир, независимый от восприятия и сознания [151].

Реальный мир структурирован [151].

Между всеми областями реального мира существует непрерывная связь [151].

Чувственные органы человека аффицируются реальным миром [151].

Мышление является функцией мозга, естественного органа человека [151].

Мышление порождает конечные и бесконечные абстрактные объекты [152].

Следствие. Мышление порождает конечные и бесконечные числа.

Рассудок, форма мышления, порождает только конечные абстрактные объекты [152].

Аксиома Архимеда. Если на прямой даны любые два отрезка A и B , то можно A повторить слагаемым столько раз, чтобы сумма была больше B [153].

2 Системно-физический уровень

Физическая система есть рассудочная (конечная) модель области реального мира.

Следствие. Физическая система имеет конечную протяженность как в пространстве, так и во времени (1.1).

Следствие. Физическая система есть совокупность конечного числа взаимодействующих физических объектов.

Следствие. Физический объект моделируется совокупностью конечного числа свойств (качеств).

Физический мир составляют взаимодействующие (открытые) физические системы.

Следствие. Закрытая система физических объектов является абстрактным объектом.

Измерение возможно при установлении качественной определенности свойства, позволяющей отличить его от других свойств (1.2).

Существует несоответствие измеряемой величины исследуемому свойству объекта (1.3).

Существует конечный элемент физической величины.

Элементы одной физической величины тождественны.

Следствие (системный аналог аксиомы Архимеда). Если дан элемент величины A и любой ее конечный размер B , то элемент A можно повторить слагаемым столько раз, чтобы сумма была равна B .

3 Метрологический уровень

В рамках принятой модели объекта исследования существует определенная измеряемая физическая величина и её истинное значение (2.1).

Истинное значение величина имеет в рамках модели закрытой (не взаимодействующей) системы.

Следствие. Истинное значение измеряемой величины постоянно (2.2).

Следствие. Истинное значение измеряемой величины отыскать невозможно (2.3).

Измерение возможно при наличии качественной и количественной априорной информации о свойствах объекта измерения (2.4).

Измерение возможно при условии установления единицы измерения величины (2.5).

Единица измерения физической величины устанавливается соглашением о количестве составляющих ее элементов эталонного объекта или процесса (эталонном числе).

Измерение возможно при сохранения неизменным во время измерения размера единицы измерения (2.6).

Измерение есть сравнение размеров опытным путем (2.7).

Измерение физической величины составляют физические операции над реальными объектами и рассудочные операции над конечными абстрактными объектами.

Результат измерения является случайным.

Результат измерения есть отношение результата счета элементов измеряемой величины у объекта измерения к числу элементов, составляющих единицу измерения этой величины (эталонному числу).

Следствие. Значение величины есть положительное рациональное число.

Содержанием рассудочного мышления являются логические и вычислительные измерительные операции.

4 Уровень проектирования интеллектуальных средств измерений

Датчик средства измерений подвергается воздействию физического мира в рамках модели физической системы.

Рассудочное мышление является функцией электронного компьютера, компонента интеллектуальной информационной системы.

Следствие. Рассудочные измерительные операции выполняются электронным компьютером.

Следствие. Последовательность измерительных преобразований любой измеряемой величины завершается преобразованием в пространственно-временное распределение электрического заряда, воспринимаемое электронным компьютером как число.

Последовательное применение принципа конечности требует изменения формы представления результата измерения в системах искусственного интеллекта посредством замены размерности как качественной (основанной на понятии «бесконечность») составляющей натуральным числом. Таким числом может являться количественная определенность размера единицы физической величины по определению при воспроизведении на основе естественного эталона [144].

Проблемой применения средств измерений в технических системах является то, что длительность жизненного цикла энергетических систем, систем связи и других больших систем на порядок и более превышает межповерочный интервал. При непрерывном использовании средства измерений его периодическая поверка требует дублирования или временной неполноты контроля состояния системы. Принципиальным образом проблема поверки решается проектированием системы, содержащей наряду со средствами измерений естественные меры измеряемых величин [165]. Стандартизация естественных мер вместо архивных позволяет осуществлять воспроизведение единиц физических величин в соответствии с их определением непосредственно в системе. Поверка становится «внутренним делом» системы. Переход на воспроизведение единиц физических величин на базе квантовых эффектов скачкообразно изменит уровень метрологического обеспечения функционирования технических систем. С меры снимается требование хранения размера единицы измерения. Оно заменяется требованием хранения информации о порядке воспроизведения единицы измерения с использованием естественных мер и соответствующих компонентов системы, обеспечивающих воспроизведение единицы измерения. Это даст возможность осуществлять метрологическое обслуживание средств измерений непосредственно в процессе

непрерывного функционирования системы на протяжении всего жизненного цикла с поддержанием требуемой точности измерений [142].

Процесс проектирования интеллектуального средства измерений будет представлять собой многоэтапный процесс декомпозиции аксиоматической системы теоретического знания при установлении и соблюдении правил соответствия. Декомпозиции подвергается некоторая универсальная модель, обобщенная функция преобразования, позволяющая решать максимально широкий круг измерительных задач данной области измерений. Результатом декомпозиции являются способы измерения и реализующие их устройства как частные реализации универсальной модели. Примером универсальной модели для области измерений комплексного сопротивления является обобщенное уравнение мостовой цепи Карандеева – Штамбергера [54]. Любой способ измерения составляющих комплексного сопротивления можно рассматривать как аппаратно – программную реализацию определенного варианта решения обобщенного уравнения.

При анализе измерения как системы В.Г. Кнорринг предложил использовать три вида декомпозиции [166].

- ориентационная, позволяющая выделять крупные и более мелкие операции (этапы и подэтапы), образующие измерительный процесс;
- функциональная, состоящая в представлении процесса измерения совокупностью взаимодействующих функций;
- уровневая, заключающаяся в рассмотрении процесса измерения на различных уровнях детализации или обобщения, аналогично известной в теории вычислительных сетей модели взаимодействия открытых систем.

При проектировании интеллектуальных средств измерений с делением объектов на физические и абстрактные (в том числе, алгоритм компьютерной программы) и измерительных операций на физические и рассудочные естественным представляется использование структурно – алгоритмической декомпозиции. Структурно – алгоритмическая декомпозиция позволяет осуществлять одновременный синтез структурной схемы и алгоритма

программного обеспечения автоматического средства измерений [167]. Целью структурно-алгоритмической декомпозиции процесса автоматического измерения является необходимость распределения между аппаратными и программными средствами системы операций, выполнявшихся в автоматизированной системе оператором. Данная задача не является тривиальной, поскольку требует формализации метрологической информации, содержащейся в таких понятиях как «квалификация», «интуиция», «профессиональное мастерство», характеризующих оператора при автоматизированных измерениях. Основой решения этой задачи является разворачивающаяся в правила проектирования интеллектуальных средств измерений система исходных положений, реализующая принцип конечности.

В анализаторе иммитанса [57] реализованы принципы адаптации и самоповеряемости (прямого метрологического самоконтроля). Организация в информационно-измерительной системе [168]. Средства измерений все чаще становятся многофункциональными, т.е. измеряются несколько физических величин и по результатам измерений вычисляются значения целого ряда параметров объекта измерения, как это имеет место при измерениях параметров и определении функциональных характеристик гетерогенных объектов в рабочих режимах.

Усложнение процедуры поверки многофункциональных СИ делает актуальной задачу ее автоматизации.

6.3 ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СРЕДСТВАХ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерение физической величины нельзя рассматривать иначе как специфический физический эксперимент, поэтому согласование основ теории автоматических измерений с исходными физическими моделями является обязательным этапом ее формирования. Метрологию с физикой объединяют

теория систем величин и единиц их измерения, а также теория размерности [138].

В метрологической деятельности теория размерностей устанавливает вид качественной составляющей значения физической величины, получаемого путем измерения, правила составления и преобразования уравнений измерения физических величин.

Различают два вида уравнений, моделирующих зависимости между физическими величинами [169]: уравнения величин и уравнения числовых значений. Уравнение величин – уравнения, отражающие законы природы, в котором под буквенными символами понимаются физические величины. Форма уравнения величин не зависит от используемых единиц измерения входящих в него величин. Уравнения величин выступают в качестве определяющих уравнений при построении системы единиц.

Уравнение числовых значений – уравнение, в котором под буквенными символами понимаются числовые значения величин, соответствующие выбранным единицам. Форма уравнения числовых значений зависит от используемых единиц измерения входящих в него величин.

Для каждой основной величин всеми пользователями согласовано определение единицы измерения и порядок ее физического воспроизведения эталоном. Характерной особенностью всех неархивных действующих и предлагаемых к использованию определений единиц измерения является наличие конечного числа, отражающего количественную определенность некоторого эталонного объекта или процесса при воспроизведении единицы измерения.

Система СИ развивается в направлении определения единиц измерения на основе квантовых эффектов и через фундаментальные физические константы. Это приводит к значительному уменьшению ступени квантования величины при воспроизведении единицы измерения, и, соответственно, возрастанию разрядности эталонных чисел вплоть до 10^{34} при использовании для определения единицы измерения постоянной Планка [170] .

Необходимо отметить, что ни уравнение величин, ни уравнение числовых значений, не несут информацию об используемом порядке воспроизведения единицы измерения в процессе измерения [145].

Интеллектуализация измерений и системность применения средств измерений принципиально изменяют содержание процесса проектирования средства измерений. Проектирование интеллектуальных средств измерений в настоящее время затрудняют:

- нацеленность современной теории измерений на описание и анализ измерительных процедур, процессов, средств и систем, а не на формирование правил их проектирования;

- отсутствие в рамках теории измерений частной теории проектирования аппаратных и программных средств компьютерной обработки измерительной информации как компонентов интеллектуальных средств измерений;

- отсутствие законченной иерархической системы моделей системного средства измерений каждой физической величины, учитывающих ее специфические особенности.

Значение физической величины представляет собой единство ее количественной и качественной определенности. Количественная определенность выражается безразмерным числом установленных единиц измерения измеряемой физической величины, качественная определенность – размерностью.

Одной из проблем проектирования интеллектуальных средств измерений является неопределенность содержащейся в размерности измерительной информации при ее компьютерной обработке, поскольку эта информация не является числовой, носит качественный характер и может восприниматься без потерь только человеком. Второй проблемой является отсутствие в результате измерения информации об эталоне, на котором построена система передачи размера единицы измерения данному средству измерений.

Чисто числовое представление значения физической величины как основа автоматической компьютерной обработки измерительной информации может быть достигнута синтезом специальной алгебры, которую можно рассматривать как объединение алгебры количеств и символьной «алгебры качеств» (правилами операций над физическими размерностями) на основе числового несущего множества [144]. При этом в структуре несущего множества этой алгебры должны однозначно отражаться качественные различия физических величин без использования символов, установленных для них и для их единиц измерения.

Алгебра количеств состоит из числового несущего множества отвлеченных рациональных чисел, входящих в значение физической величины, результата измерения, и арифметических операций, заданных на этом множестве.

Теория размерностей физических величин рассматривается как алгебра качеств, основанная на несущем символьном множестве основных физических величин $\{LMTI\Theta NJ\}$ (длина, масса, время, сила электрического тока, температура, количество вещества, сила света) и их единиц измерения [m, kg, s, A, K, mol, cd], на которых строится Международная система единиц (СИ), и операций, заданных на этом множестве.

Синтез специальной алгебры затрудняется различиями правил выполнения арифметических операций, обозначаемых одинаковыми символами (+, -, /) в алгебре качеств и алгебре количеств. Так, если a – символ переменной несущего числового множества, то $a + a = 2a$, $a - a = 0$, но, если A – элемент символьного множества единиц измерения основных величин системы СИ, единица силы электрического тока «Ампер», то $[A] + [A] = [A]$, $[A] - [A] = [A]$. В алгебре количеств символ «/» обозначает деление, операндами и результатом которого являются числа – элементы несущего числового множества, а в алгебре качеств тот же символ обозначает сопоставление в форме отношения качеств физических объектов. При однородности сопоставляемых качеств

результатом операции является «нулевая размерность», которую имеют безразмерные физические величины (относительная диэлектрическая проницаемость, телесный угол) и результаты относительных измерений. При сопоставлении неоднородных качеств (различных независимых физических величин) результат операций «деление» и «умножение» не может быть обозначен символом какого – либо элемента несущего символьного множества алгебры качеств. Следовательно, деление и умножение неоднородных качеств можно рассматривать как алгебраические операции, которые заданы (разрешены) на несущем множестве алгебры качеств, но для обеспечения замкнутости алгебры их результат не формируется: $[m]/[s]=[m/s]$.

Анализ показывает, что правила операций алгебры качеств над размерностями совпадают с правилами операций над неопределенностями. Следовательно, неопределенности типов ∞/∞ , $\infty \cdot \infty$, $\infty + \infty$, $\infty - \infty$ могут рассматриваться как математические модели операций с размерностями, где операнды и результат операции совпадают: $\infty/\infty = \infty$, $\infty \cdot \infty = \infty$, $\infty \pm \infty = \infty$. При этом следует учитывать, что «эти символы лишены всякого числового смысла» [164].

При интеллектуализации измерений физических величин целесообразен переход к чисто числовой математической модели значения физической величины путем выполнения действия, которое можно назвать «обратным предельным переходом». Обратный предельный переход состоит в установлении для каждой аналоговой физической величины X ее конечного минимального неделимого размера $1/N_X$, где N_X – некоторое натуральное число, символизирующее данную физическую величину. Единица измерения 1_X физической величины X представляется при этом в виде $1_X = N_X/N_X$.

Число N_X должно иметь физический и метрологический смысл. Для придания числам этого смысла и конкретизации чисел для основных физических величин системы СИ следует обратиться к неархивным определениям единиц измерения этих величин.

Общей особенностью всех определений единиц измерения, не основанных на архивных эталонах, является наличие в каждом из них числа, устанавливающего соотношение размеров единицы измерения и элемента данного качества (физического свойства). Именно это эталонное число является количественной характеристикой данного качества и позволяет устройству, воспроизводящему единицу измерения путем подсчета элементарных событий или объектов до эталонного числа, выступать при измерениях в роли меры. Соглашением об эталонном числе физической величины устанавливается однозначность и уникальность квантования единицы измерения этой величины.

Возможные эталонные числа основных и дополнительных величин системы СИ представлены в таблице 6.1 [144].

Таблица 6.1 – Возможные эталонные числа основных и дополнительных величин системы СИ

Наименование физической величины	Эталонное число
Время	9192631770
Длина	299792458
Масса	100000008
Термодинамическая температура	27316
Количество вещества	$60221367 \cdot 10^{16}$
Сила электрического тока	$5 \cdot 10^6$
Сила света	$1683 \cdot 299792458^2$
Плоский угол	1296000
Телесный угол	299792458^2

Чисто числовое представление значения физической величины позволяет осуществлять представление и компьютерную обработку измерительной информации без потерь ее качественной составляющей с использованием только цифровых символов и однозначно интерпретируемых символов

арифметических операций, что упрощает разработку программного обеспечения и повышает надежность интеллектуальных средств измерений.

6.4 ГИПЕРЧИСЛОВЫЕ МОДЕЛИ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ИЗМЕРЕНИЯ

При управлении многопараметрическими динамическими объектами с участием человека актуальной научной проблемой является сжатие больших объемов измерительной информации до объема, который человек может оперативно анализировать при принятии управленческого решения. Одним из способов сжатия информации является установление комплексного показателя состояния технической системы, обобщающего множество частных показателей.

Одним из основных требований к технической системе является стабильность функционирования в течение определенного интервала времени, которая проявляется неизменностью значений конечного ряда параметров системы $X_1, \dots, X_n, \dots, X_N$. Стабильное состояние системы, гомеостаз, характеризуется определенным сочетанием номинальных значений параметров $X_{10}, \dots, X_{n0}, \dots, X_{N0}$ и диапазонами допустимых отклонений каждого параметра от его номинального значения, при которых состояние гомеостаза сохраняется. Количественной оценкой стабильности параметра является его нестабильность в виде размаха или другой числовой характеристики закона распределения. Гомеостаз обеспечивает стабильность реализации целевой функции системы, например, заданную нестабильность количественной характеристики качества продукции системы. Нестабильность характеристики качества продукции обусловлена совместным влиянием нестабильностей параметров системы, поэтому актуальна задача синтеза некоторого обобщенного показателя.

Основная трудность формирования обобщенного показателя нестабильности гомеостаза системы состоит в том, что характеристические

параметры имеют различную размерность, поэтому с ними нельзя производить арифметические операции. Обобщенный показатель должен быть безразмерным и являться функцией гомеостатических значений параметров системы.

Поэтому в качестве текущего значения показателя неустойчивости системного параметра целесообразно принять отношение результата измерения данного параметра x_{Mn} к его гомеостатическому размеру x_{0n} : $h_1 = x_{M1}/x_{01}, \dots, h_n = x_{Mn}/x_{0n}, \dots, h_N = x_{MN}/x_{0N}$. Оценки числовых характеристик показателей неустойчивости параметров гомеостаза $H_1, \dots, H_n, \dots, H_N$ вычисляются путем накопления и обработки выборок результатов многократных измерений этих параметров.

Обобщенный показатель неустойчивости гомеостаза системы может быть сформирован как нормированная сумма взвешенных показателей неустойчивости системных параметров [147]:

$$H = \frac{\sum_{n=1}^N k_n H_n}{\sum_{n=1}^N k_n} . \quad (6.1).$$

Правильность и полнота набора характеристических параметров и их весовых коэффициентов k_n для данной технической системы доказывается принадлежностью выборок значений обобщенного показателя неустойчивости гомеостаза и контролируемой характеристики качества продукции одной генеральной совокупности.

Недостатками использования этого и других подобных обобщенных показателей являются невозможность учета корреляционных связей между показателями и возможное «маскирование» выхода значения одного из частных параметров состояния из диапазона допустимых значений противоположными отклонениями других параметров. Это обуславливает формулирование задачи совершенствования методов косвенного измерения параметров гетерогенных объектов путем синтеза моделей импеданса более высокой размерности,

учитывающих зависимости исследуемых параметров объекта от разнородных влияющих величин. Математическое моделирование многомерного объекта измерения физических величин основывается на использовании одной из алгебр, в которой выполнима операция деления. В соответствии с теоремой Фробениуса существует только 4 нормированных алгебры с делением [171]: алгебра действительных чисел, алгебра комплексных чисел, алгебра кватернионов. Числа несущих множеств алгебр кватернионов и октонионов называются гиперкомплексными числами.

Математическое моделирование процесса измерения физической величины основано на алгебре действительных чисел. Так, косвенное измерение электрического сопротивления постоянному току моделируется отношением результата прямого измерения напряжения на объекте к результату прямого измерения тока через объект. Алгебра действительных чисел также используется при измерениях скалярных параметров комплексного сопротивления: модуля комплексного сопротивления как отношения амплитудных или действующих значений переменного напряжения и тока, а также фазового сдвига между напряжением и током как отношения интервала времени между моментами начала периода гармонического напряжения и созданного им тока к периоду.

Алгебра комплексных чисел используется для математического моделирования импеданса. Комплексное число отражает наличие у импеданса активной и реактивной составляющих. Измерение составляющих импеданса позволяет оценивать, кроме других ПКС, такие векторные параметры объектов исследования как относительная диэлектрическая проницаемость (составляющие – диэлектрическая проницаемость и диэлектрические потери), относительная магнитная проницаемость (магнитная проницаемость и магнитные потери) и т.п.

По результатам измерения СКС вычисляются параметры материалов функциональной электроники [148]: составляющие магнитной проницаемости нанокристаллического тороидального сердечника [172], вольт – амперные

характеристики структур с сегнетоэлектрическими керамическими пленками [173], составляющие относительной диэлектрической проницаемости и тангенс угла диэлектрических потерь керамики PZT-PMN, модифицированной Sr_2 + [174].

Однако двумерная математическая модель импеданса в виде комплексного числа не отражает достаточно полно многочисленные существенные особенности объекта исследования: зависимость магнитной проницаемости от частоты напряжения и температуры [172], нелинейность вольтамперной-характеристики сегнетоэлектрической керамической пленки [173], форму и размеры структурных элементов керамики PZT-PMN и зависимость импеданса от температуры [174]. Физические величины, изменения которых вызывают изменения значения измеряемой величины, рассматриваются как влияющие и не входят в уравнение измерения. В электронных устройствах импеданс полупроводниковых и диэлектрических компонентов является функцией амплитуды (нелинейность) и частоты напряжения на объекте измерения, а также температуры объекта.

Использование алгебры кватернионов позволяет в технических системах с искусственным интеллектом ввести в математическую модель объекта составляющие, отражающие нелинейность и термозависимость импеданса гетерогенного объекта в рабочих режимах. Для этой расширенной модели импеданса гетерогенного объекта предлагается ввести понятие гиперимпеданса

$$ZH = R + jX + iU + kQ, \quad (6.2)$$

где U – амплитуда синусоидального напряжения на объекте измерения, Q – температура объекта, i, k – единичные векторы.

При исследовании гетерогенного объекта на основе гиперкомплексных моделей в измерительную схему устройства для измерений ПКС вместо опорного элемента может быть включён образцовый гетерогенный объект с нормированным гиперимпедансом ZH_0 . Анализ измерительных сигналов с применением искусственного интеллекта позволит исследовать зависимости параметров гетерогенного объекта от разнородных влияющих факторов как при

одновременном воздействии фактора на исследуемый и опорный объекты, так и при воздействии фактора только на исследуемый объект при нахождении образцового объекта в условиях, принятых за нормальные.

Алгебра октонионов позволяет синтезировать модель объекта исследования, содержащую все семь основных величин системы СИ. Для данной модели целесообразно ввести понятие гиперкомплексного импеданса, который определяется как

$$Z_{HC} = t + jL + iM + kT + lN + Itl + jlQ + klJ, \quad (6.3)$$

где t -время, L – длина, M – масса, T -динамический параметр объекта, например, постоянная времени релаксации диэлектрика, N - количество вещества, J – сила света, l, il, jl, kl – единичные векторы.

При развитии технологий искусственного интеллекта данная модель имеет практически неограниченную область применения при оценивании состояния многопараметрических искусственных и естественных систем.

Измерительный контроль состояния многопараметрического объекта в рабочих условиях на основе гиперкомплексной модели объекта по разнородной измерительной информации в форме октониона может осуществляться следующим способом [149]:

1. Для каждого из множества контролируемых параметров устанавливают верхний и нижний пределы допустимых значений. При этом в зависимости от целей проведения контроля состояния объекта для каждого контролируемого параметра устанавливаются несколько верхних и нижних пределов допустимых значений, что, дает возможность повысить достоверность контроля за счет различения большего числа качественно различных состояний объекта контроля и выявления трендов.

2. Формируются октонион верхних предельных значений контролируемых параметров и октонион нижних предельных значений контролируемых параметров.

3. В процессе контроля осуществляются измерения контролируемых параметров и регистрация их результатов.

4. Из результатов измерений формируется октонион действительных значений контролируемых параметров.

5. Определение состояния контролируемого объекта осуществляется путем выполнения над сформированными октонионами операций допустимых математических операций вычитания и деления и анализа результатов этих операций.

Разработка интеллектуальных средств измерений открывает возможность использования гиперкомплексных математических моделей многопараметрических, в частности, гетерогенных объектов в информационно-измерительных и управляющих системах. Гиперкомплексные модели с чисто числовым представлением результатов измерений обеспечат более полное описание состояния объекта исследования за счет формирования большего числа как частных, так и комплексных (интегральных и дифференциальных) количественных показателей. Это повысит качество решений, принимаемых искусственным интеллектом.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 6

1 Разработка интеллектуальных средств измерений представляет собой междисциплинарную научную проблему, требующую для своего решения привлечения всей системы научного знания на основе системного подхода. На основе известных вариантов системы аксиом измерений сформирована иерархическая система исходных положений проектирования интеллектуальных средств измерений. Систему составляют философский, системно-физический, метрологический и инженерный уровень. Аксиомы адаптированы к искусственному интеллекту на основе принципа конечности (финитности), вытекающего из понимания границы как атрибута системы. Конструктивно введенными понятиями предлагается считать дискретную модель физической величины.

2 Одной из проблем проектирования интеллектуальных средств измерений является неопределенность содержащейся в размерности измерительной информации при ее обработке искусственным интеллектом, поскольку эта информация является нечисловой и носит качественный характер, указывая на вид измеряемой величины. Полным решением проблемы является переход к чисто числовой форме записи значения физической величины на основе представления единицы физической величины в виде рационального числа, числитель и знаменатель которого есть число, установленное в определении единицы этой физической величины.

3 Интеллектуализация средств измерений открывает возможность усложнения математических моделей объектов измерения и объектов управления путем увеличения количества измеряемых (контролируемых) количественных параметров объекта, а также включением влияющих величин в состав измеряемых величин. Моделирование многопараметрических объектов гиперкомплексными числами обеспечат более полное описание состояния объекта за счет формирования большего числа как частных, так и комплексных (интегральных и дифференциальных) количественных показателей. Это повысит качество решений, принимаемых искусственным интеллектом в информационно-измерительных системах и управляющих системах в различных отраслях науки и техники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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.

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.

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

отношение 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.

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.

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.

Результаты теоретических исследований получили практическую реализацию. Разработаны и внедрены в производство резисторов Р1-74 (завод «Бином», г. Владикавказ) установки для измерений сопротивления и оценивания коэффициента нелинейности высоковольтных высокоомных резисторов 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 ± 10 %; диапазон измерения сопротивления, $22 \dots 15 \cdot 10^3$ МОм; диапазон измерения напряжения 1...20 кВ; относительная погрешность измерения сопротивления не более ± 2 %; относительная погрешность измерения напряжения не более ± 2 %.

Преобразователь ПКС дифференциального емкостного датчика в напряжение, электрическая ёмкость 30...50 пФ, чувствительность 1 пФ/В, время преобразования не более 0,1 мс, долговременная нестабильность ± 1 мВ/ 8 часов, 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).

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».

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.

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.

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».

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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 (37). – С. 20–29.
2. База данных «Регрессионные модели взаимосвязей параметров МДО-процесса. Параметры, характеризующие пробой покрытий» : свидетельство о гос. регистрации базы данных № 2020621594 / Е.А. Печерская, П.Е. Голубков, О.В. Карпанин, М.И. Сафронов, В.А. Баранов. Дата госрегистрации 31.08.2020. – URL: <https://www1.fips.ru/iiss/document.xhtml?facesredirect=true&id=d02ac2ee>
3. 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, 19–21 ноября 2018 г.). – Пенза : Изд-во ПГУ, 2018. – С. 171–172.
4. 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 (69). – С. 101–113.
5. 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.
6. Баранов, В.А. Измерения параметров композиционных диэлектрических материалов : монография. – Пенза : ИИЦ ПГУ, 2008. – 124 с.

7. Тушинский, Л.И. Синергетические основы эволюции структур в современном материаловедении / Л.И. Тушинский // Фракталы и прикладная синергетика : сборник тезисов Первого Междисциплинарного семинара (Москва, 18–21 октября 1999 г.). – Москва, 1999. – С. 17–18.
8. Кнеллер, В.Ю. Автоматическое измерение составляющих комплексного сопротивления / В.Ю. Кнеллер. – Москва ; Ленинград : Энергия, 1967. – 367 с.
9. Бронштейн, И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – Москва : Наука, 1980. – 976 с.
10. Кнеллер, В.Ю. Определение параметров много элементных двухполюсников / В.Ю. Кнеллер, Л.П. Боровских. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 144 с.
11. Хасцаев, Б.Д. Введение в моделирование импеданса биообъектов и применение его информационных свойств в медицине и биологии / Б.Д. Хасцаев. – Владикавказ : Терек, 1995. – 108 с.
12. Цыпин, Б.В. Методы диагностики и измерительные преобразователи для приборов и систем контроля узлов электронной аппаратуры : учебное пособие / Б.В. Цыпин, А.И. Мартяшин. – Пенза : Политехн. ин-т, 1989. – 80 с.
13. 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.
14. Лошкарев, Г.Л. Теоретические основы и эквивалентная электрическая схема кондуктометрической высокочастотной ячейки / Г.Л. Лошкарев, Л.А. Лопатин // Электрохимия. – 1983. – Т. 19, вып. 10. – С. 1360–1366.

15. Эпштейн, С.Л. Справочник по измерительным приборам для радиодеталей / С.Л. Эпштейн, А.П. Викулов, В.Н. Москвин ; под редакцией Е.А. Галиша. – Ленинград : Энергия, 1980. – 256 с.
16. Берман, Л.С. Емкостные методы исследования полупроводников / Л.С. Берман. – Ленинград : Наука, 1972. – 104 с.
17. Аксельрод, С.М. О некоторых ошибках при измерении диэлектрической проницаемости материалов с большим углом потерь / С.М. Аксельрод // Измерительная техника. – 1967. – № 5. – С. 41–43.
18. Клионский, М.Д. Частотная зависимость мер емкости с воздушным диэлектриком Р597 / М.Д. Клионский, В.П. Салюк // Измерительная техника. – 1990. – № 7. – С. 41–43.
19. Негоденко, О.Н. Использование эквивалентной индуктивности аналога негatrona в перестраиваемом автогенераторе для пьезорезонансного датчика / О.Н. Негоденко, Ю.П. Мардамшин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2000. – № 12. – С. 63–64.
20. Передельский, Г.И. Мостовые цепи с импульсным питанием / Г.И. Передельский. – Москва : Энергоатомиздат, 1988. – 192 с.
21. Галль, Л.Н. Низкочастотная индуктивная диэлькометрия – информативный метод для изучения структурирования воды в водных растворах / Л.Н. Галль, С.И. Максимов, Т.С. Скуридина, Н.Р. Галль // Научное приборостроение. – 2016. – Т. 26, № 1. – С. 26–33.
22. Эпштейн, С.Л. Измерения характеристик конденсаторов / С.Л. Эпштейн. – Ленинград : Энергия, 1972. – 220 с.
23. Богомольский, В.М. Использование эффекта электрической неустойчивости для неразрушающего контроля старения структур металл-диэлектрик-металл / В.М. Богомольский // Измерительная техника. – 1999. – № 8. – С. 51–55.
24. Свистунов, Б.Л. Измерители параметров катушек индуктивности / Б.Л. Свистунов, П.П. Чураков. – Пенза : Пенз. гос. ун-т, 1998. – 180 с.

25. Фрелих, Г. Теория диэлектриков. Диэлектрическая проницаемость и диэлектрические потери / Г. Фрелих. – Москва : Изд-во иностранной литературы, 1960. – 252 с.
26. Информационные технологии в химии // Азбука веб-поиска для химиков : [сайт]. – URL: www.abc.chemistry.bsu.by/vi/analiser/help.html
27. Тарасевич, М.Р. Спектроскопия электрохимического импеданса реакции ионизации водорода в газовых смесях, содержащих CO₂ на Pt, Rd и PdRu катализаторах в 0,5 М растворах H₂SO₄ / М.Р. Тарасевич, З.А. Ротенберг, Н.М. Загудаев, М.Р. Эренбург, В.А. Богдановский // Международный Научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2007. – № 2 (46). – С. 118–123.
28. Секушин, Н.А. Импеданс спектроскопия материалов со смешанной электронно-ионной проводимостью / Н.А. Секушин, И.В. Клочкова // Химия твёрдого тела и современные микро и нанотехнологии : сборник тезисов VIII Международной научной конференции (Кисловодск, 07–11 сентября 2008 г.). – Кисловодск ; Ставрополь : СевКавГТУ, 2008. – 458 с.
29. Москвичев, А.А. Исследование кинетических закономерностей и параметров окисления кадмия в ограниченном объеме щелочного электролита / А.А. Москвичев, Ю.Л. Гунько, М.Г. Михаленко, А.Н. Москвичев // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. – 2010. – № 1 (80). – С. 230–235.
30. Импедансная спектроскопия электролитических материалов : учебное пособие / составители: Е.С. Буянова, Ю.В. Емельянова ; Уральский государственный университет. – Екатеринбург, 2008. – 70 с.
31. Havriliak, S. A Complex Plane Representation of Dielectric and Mechanical Relaxation Processes in Some Polymers / S. Havriliak, S. Negami // Polymer. – 1967. – Vol. 8. – P. 161–210. – doi: 10.1016/0032-3861(67)90021-3
32. Kobayashi, Kiyoshi Development of an electrochemical impedance analysis program based on the expanded measurement model / Kiyoshi Kobayashi,

Yoshio Sakka, Tohru S. Suzuki // Journal of the Ceramic Society of Japan. – 2016. – Vol. 124 (9). – P. 943–949. – doi: 10.2109/jcersj2.16120

33. Импедансная спектроскопия: теория и применение : учебное пособие / Ю.В. Емельянова, М.В. Морозова, З.А. Михайловская, Е.С. Буянова ; под общей редакцией Е. С. Буяновой. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2017. – 156 с.

34. Денисов, Е.С. Исследование диагностических свойств электрического шума водородного топливного элемента / Е.С. Денисов // Электроника и информационные технологии. – 2009. – № 2 (7).

35. Fleischer, Christian On-line adaptive battery impedance parameter and state estimation considering physical principles in reduced order equivalent circuit battery models: Part 1. Requirements, critical review of methods and modeling / Christian Fleischer, Wladislaw Waag, Hans-Martin Heyn, Dirk Uwe Sauer // Journal of Power Sources. – 2014. – Vol. 260. – P. 276–291. – URL: <https://doi.org/10.1016/ISSN 0378-7753>

36. Shuquan, Peng Study on Electrochemical Impedance Response of Sulfate Saline Soil / Peng Shuquan, Wang Fan, Fan Ling // Int. J. Electrochem. Sci. – 2019. – Vol. 14. – P. 8611–8623. – doi: 10.20964/2019.09.30

37. Si, Keyu A two-dimensional MoS₂/WSe₂ van der Waals heterostructure for enhanced photoelectric performance / Keyu Si, Jingyao Ma, Chunhui Lu, Yixuan Zhou, Chuan He, Dan Yang, Xiumin Wang, Xinlong Xu // Applied Surface Science. – 2020. – Vol. 507. – P. 145082. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.145082> ISSN 0169-4332

38. Salehzadeh, Delaram Electrophoretic deposited Ni(OH)₂-YSZ and NiO-YSZ nanocomposite coatings, microstructural and electrochemical evaluation / Delaram Salehzadeh, Pirooz Marashi, Zahra Sadeghian // Surface and Coatings Technology. – 2020. – Vol. 381. – P. 125155.

39. Ghahremani, Amir H. Rapid fabrication of perovskite solar cells through intense pulse light annealing of SnO₂ and triple cation perovskite thin films / Amir H. Ghahremani, Blake Martin, Alexander Gupta, Jitendra Bahadur,

Krishnamraju Ankireddy, Thad Druffel // *Materials & Design*. – 2020. – Vol. 185. – P. 108237.

40. Sahlot, Pooja Uncompensated-spins induced weak ferromagnetism in $\text{Ca}_3\text{Mn}_2\text{O}_7$: Magneto-conductive and dual magneto-capacitive effects / Pooja Sahlot, A.M. Awasthi // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2020. – Vol. 493. – P. 165732.

41. Halvorsen, Ivar J. Electrochemical low-frequency impedance spectroscopy algorithm for diagnostics of PEM fuel cell degradation / Ivar J. Halvorsen, Ivan Pivac, Dario Bezmalinović, Frano Barbir, Federico Zenith // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2020. – Vol. 45, № 2. – P. 1325–1334.

42. Mohamed, Ibrahim M.A. Electrochemical impedance investigation of urea oxidation in alkaline media based on electrospun nanofibers towards the technology of direct-urea fuel cells / Ibrahim M.A. Mohamed, Palsamy Kanagaraj, Ahmed S. Yasin, Waheed Iqbal, Changkun Liu // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2020. – Vol. 816. – P. 152513.

43. Ahmed, Hawzhin T. Effect of PEG as a plasticizer on the electrical and optical properties of polymer blend electrolyte MC-CH- LiBF_4 based films / Hawzhin T. Ahmed, Viyan J. Jalal, Dana A. Tahir, Azhin H. Mohamad, Omed Gh. Abdullah // *Results in Physics*. – 2019. – Vol. 15. – P. 102735.

44. Mguedla, R. Structural, electrical, dielectric and optical properties of PrCrO_3 ortho-chromite / R. Mguedla, A. Ben Jazia Kharrat, M. Saadi, K. Khirouni, N. Chniba-Boudjada, W. Boujelben // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2020. – Vol. 812. – P. 152130.

45. Mandal, Bithika Interpretation of electrical conduction mechanism by Godet's VRH model in TiO_2 incorporated MnCo_2O_4 host matrix / Bithika Mandal, Partha Mitra // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2020. – Vol. 812. – P. 152129.

46. Al Boukhari, J. Structural analysis and dielectric investigations of pure and rare earth elements (Y and Gd) doped NiO nanoparticles, / J. Al Boukhari, A. Khalaf, R. Awad // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2020. – Vol. 820. – P. 153381.

47. Halder, Sarbasri Structural, dielectric and electrical properties of bismuth magnesium tantalate electronic system / Sarbasri Halder, Satyanarayan Bhuyan, R.N.P. Choudhary // Journal of Magnesium and Alloys. – 2019. – Vol. 7, № 4. – P. 628–636.

48. Карандеев, К.Б. Специальные методы электрических измерений / К.Б. Карандеев. – Ленинград : Госэнергоатомиздат, 1962. – 344 с.

49. Кнеллер, В.Ю. Координированное уравнивание, его особенности и возможности / В.Ю. Кнеллер // Приборы и системы управления. – 1971. – № 3. – С. 15–18.

50. Гриневич, Ф.Б. Высокоточные вариационные измерительные системы переменного тока / Ф.Б. Гриневич, М.Н. Сурду. – Киев : Наукова думка, 1989. – 192 с.

51. Жиленков, И.В. Об измерении диэлектрической постоянной и поглощения методом мостика Нернста в широком диапазоне частот / И.В. Жиленков // ЖЭТФ. – 1946. – № 9. – С. 770–775.

52. Сви, П.М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения / П.М. Сви. – Москва : Энергоатомиздат, 1992. – 240 с.

53. Кнеллер, В.Ю. Автоматические измерители комплексных величин с координированным уравниванием / В.Ю. Кнеллер, Ю.Р. Агамалов, А.А. Десова. – Москва ; Ленинград : Энергия, 1975. – 168 с.

54. Раздельное преобразование комплексных сопротивлений / Е.Е. Добров, И.Г. Татаринцев, В.Н. Черноус, Г.А. Штамбергер ; под редакцией Г.А. Штамбергера. – Львов : Высшая школа, 1985. – 134 с.

55. Мартяшин, А.И. Преобразователи электрических параметров для систем контроля и измерения / А.И. Мартяшин, Э.К. Шахов, В.М. Шляндин. – Москва : Энергия, 1976. – 392 с.

56. Мартяшин, А.И. Перспективные направления развития измерителей параметров многоэлементных электрических цепей / А.И. Мартяшин, А.В. Светлов // Актуальные проблемы науки и образования : труды Международного юбилейного симпозиума : в 2-х т. Т. 2 / под редакцией

доктора технических наук, профессора М.А. Щербакова. – Пенза : ИИЦ ПГУ, 2003. – С. 288–290.

57. Агамалов, Ю.Р. Виртуальный самоверяемый анализатор иммитанса с адаптивными функциональными возможностями / Ю.Р. Агамалов, Д.А. Бобылев, Л.П. Боровских, В.Ю. Кнеллер // Датчики и системы. – 2008. – № 7. – С. 21–27.

58. Цыпин, Б.В. Измерение импедансов системами с ЭВМ : монография / Б.В. Цыпин. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2001. – 100 с.

59. Чураков, П.П. Измерительные схемы преобразователей пассивных параметров электрических цепей / П.П. Чураков // Информационно-измерительная техника : Межвузовский сборник научных трудов. Вып. 25. – Пенза, 2000. – С. 146–153.

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

61. 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.

62. Баранов, В.А. Комбинированная модель диэлектрического материала / В.А. Баранов // Методы и средства измерений : материалы IV Всероссийской научно-технической конференции. – Нижний Новгород, 2002. – С. 20.

63. 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, 2016. – С. 38–40.

64. 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.

65. 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.

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

67. 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.

68. 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.

69. 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.

70. Баранов, В.А. Аналого-цифровой преобразователь иммитанса для унифицированного канала информационно-измерительных и управляющих систем / В.А. Баранов, В.Н. Ашанин, Е.А. Ломтев, Б.В. Цыпин // Известия

высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2015. – № 4. – С. 96–108.

71. 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.

72. Патент 2214609 РФ, МПК G 01 R27/02. Способ измерения составляющих комплексного сопротивления двухполюсника и напряжения на нем / А.А. Андрюшаев, В.А. Баранов, Вл.А. Баранов, В.П. Буц, В.Г. Недорезов, А.Н. Шестернин.

73. Соболев, И.М. Метод Монте-Карло / И.М. Соболев. – Москва : Наука, 1968. – 64 с.

74. Данилов, А.А. Об асимметрии функции плотности распределения вероятностей погрешности результатов измерений, полученных с помощью сложных измерительных каналов измерительных систем / А.А. Данилов, С.А. Шумарова // Измерительная техника. – 2012. – № 11. – С. 60–61.

75. Pecherskaya, E.A. Automated method of measuring the temperature dependences of the dielectric parameters of ferroelectrics with second kind phase transition / E.A. Pecherskaya, D.V. Ryabov, J.V. Shepeleva, R.M. Pecherskaya // J. Phys.: Conf. Ser. – 2014. – Vol. 541 (1). – P. 012012.

76. Rudy, A. Determination of Diffusion Coefficients of Lithium in Solid Electrolyte LiPON / A. Rudy, A. Mironenko, V. Naumov, A. Novozhilova, A. Skundin, I. Fedorov // Batteries – 2021. – Vol. 7 (2). – P. 21. – doi: 10.3390/batteries7020021

77. Hahremani, A.G. Rapid fabrication of perovskite solar cells through intense pulse light annealing of SnO₂ and triple cation perovskite thin films / A.G. Hahremani, B. Martin, A. Gupta, J. Bahadurm, K. Ankireddy, T. Druffel // Materials & Design. – 2020. – Vol. 185. – P. 108237.

78. Halvorsen, I.J. Electrochemical low-frequency impedance spectroscopy algorithm for diagnostics of PEM fuel cell degradation / I.J. Halvorsen, I. Pivac,

D. Bezmalinovic, F. Barbir, Federico Zenith // Int. J. hydrogen energy. – 2020. – Vol. 45, № 2. – P. 1325–1334.

79. Aziz, S.B. Fabrication of energy storage EDLC device based on CS:PEO polymer blend electrolytes with high Li^+ ion transference number / S.B. Aziz, M.A. Brza, M.H. Hamsan, M.F.Z. Kadir // Results in Physics. – 2019. – Vol. 15 (7). – P. 102584.

80. Cox, M. Evaluation of Measurement Uncertainty Based on the Propagation of Distributions Using Monte Carlo Simulation / M. Cox, P. Harris, B.R.L. Siebert // Meas. Tech. – 2003. – Vol. 46. – P. 824–833.

81. Impedance measurement: transformation of the probability density function of the results uncertainty / V.A. Baranov, M.G. Myasnikova, E.A. Pecherskaya [et al.] // JOP Conference Series: Metrological Support of Innovative Technologies (Krasnoyarsk, 04 March 2020) / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. – Vol. 1515. – Krasnoyarsk : Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. – P. 52024. – doi: 10.1088/1742-6596/1515/5/052024

82. Карандеев, К.Б. Обобщенная теория мостовых цепей переменного тока / К.Б. Карандеев, Г.А. Штамбергер. – Новосибирск : РИО СО АН СССР, 1961. – 224 с.

83. Добровинский, И.Р. Проектирование ИИС для измерения параметров электрических цепей / И.Р. Добровинский, Е.А. Ломтев. – Москва : Энергоатомиздат, 1997. – 121 с.

84. Шлыков, Г.П. Теория измерений: уравнения, модели, оценивание точности : учебное пособие / Г.П. Шлыков. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2008. – 100 с.

85. Баранов, В.А. Базовые структуры устройства для измерения составляющих нелинейного комплексного сопротивления гетерогенных объектов / В.А. Баранов // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации «Шлядинские чтения – 2022» :

материалы

XIV Международной научно-технической конференции с элементами научной школы и конкурсом научно-исследовательских работ для обучающихся и молодых ученых (Пенза, 24–26 октября 2022 г). – Пенза : Изд-во ПГУ, 2022. – С. 31–35.

86. Андрияшев, А.М. Исключение влияния импедансов приборов при измерении параметров диэлектрических материалов / А.М. Андрияшев, 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.

87. Баранов, В.А. Оценивание погрешностей согласования при измерениях составляющих комплексного сопротивления / В.А. Баранов // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 11-6. – С. 1441–1444.

88. Добровинский, И.Р. Проектирование ИИС для измерения параметров электрических цепей / И.Р. Добровинский, Е.А. Ломтев. – Москва : Энергоатомиздат, 1997. – 120 с.

89. Отт, Г. Методы подавления шумов и помех в электронных системах / Г. Отт ; под редакцией М.А. Гальперина. – Москва : Мир, 1979. – 320 с.

90. 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.

91. 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 // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 4. – С. 49–56.

92. 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. – 2013. – № 1. – С. 41–47.

93. Нефедьев, Д.И. Измерения активных и пассивных электрических величин в высоковольтных электрических сетях / Д.И. Нефедьев, В.А. Баранов // Метрология. – 2013. – № 11. – С. 39–46.

94. Кривошеев, В.И. О некоторых возможностях и проблемах современного цифрового спектрального анализа / В.И. Кривошеев, С.Ю. Лупов // Вестник Нижегородского университета им. Лобачевского. – 2011. – № 5. – С. 109–117.

95. Совершенствование алгоритмов сжатия-восстановления сигналов для систем телеизмерений / Е.А. Ломтев, М.Г. Мясникова, Н.В. Мясникова, Б.В. Цыпин // Измерительная техника. – 2015. – № 3. – С. 11–15.

96. Tsy-pin, B.V. Application of the Quotient-Difference Algorithm for Measurement Tasks / B.V. Tsy-pin, M.G. Myasnikova // Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2020 – Proceedings (Moscow, 11–13 March 2020). – Moscow, 2020. – P. 9067507. – doi: 10.1109/MWENT47943.2020.9067507

97. Марпл.-мл., С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения : перевод с английского / С.Л. Марпл.-мл. – Москва : Мир, 1990. – 584 с.

98. Мясникова, Н.В. Экстремальная фильтрация и её приложения / Н.В. Мясникова, М.П. Берестень // Датчики и системы. – 2004. – № 4. – С. 8–11.

99. Мясникова, Н.В. Аппроксимация многоэкстремальных функций и ее приложения в технических системах / Н.В. Мясникова, М.П. Берестень, М.П. Строганов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 2 (18). – С. 113–119.

100. Цыпин, Б.В. Применение методов цифрового спектрального оценивания в задаче измерения параметров сигнала / Б.В. Цыпин, М.Г. Мясникова, В.В. Козлов, С.В. Ионов // Измерительная техника. – 2010. – № 10. – С. 26–30.

101. Huang, N.E. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for non-linear and non-stationary time series analysis / N.E. Huang, S.R. Long, Zheng Shen, M.L.C. Wu // Proc. Royal Soc. – London, 1998. – Vol. 454. – P. 903–995.

102. Терехина, А.В. Сжатие информации в информационно-измерительных и управляющих системах / А.В. Терехина // Датчики и системы: методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации : труды Международной научно-технической конференции с элементами научной школы для молодых ученых. – Пенза, 2012. – С. 13.

103. Малла, С. Вейвлеты в обработке сигналов / С. Малла. – Москва : Мир, 2005. – 671 с.

104. Методические указания по контролю электрооборудования под рабочим напряжением РАО «ЕЭС России». – Москва, 1996. – 16 с.

105. Нефедьев, Д.И. Методы и средства измерений коэффициентов преобразования измерительных трансформаторов / Д.И. Нефедьев. – Пенза : ПГУ, 2006. – 128 с.

106. Андреев, А.Б. Вторичный преобразователь для емкостного датчика / А.Б. Андреев, В.А. Баранов, Вл.А. Баранов // Приборы и техника эксперимента. – 1990. – № 6. – С. 182–184.

107. 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.

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

109. Баранов, В.А. Измерение влагосодержания автомобильных масел / В.А. Баранов, И.А. Кострикина // Методы и средства измерения в системах контроля и управления : труды Международной

научно-технической конференции. – Пенза : ИИЦ ПГУ, 2002. – С. 25.

110. 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. – С. 391–392.

111. Лейтман, М.Б. Нормирующие измерительные преобразователи электрических сигналов / М.Б. Лейтман. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 144 с.

112. Баранов, В.А. Корректор передаточной характеристики электронных датчиков / В.А. Баранов, А.А. Легошин, Н.А. Ермолаев, Вл.А. Баранов // Электронная техника. Серия 5. – 1987. – Вып. 1 (268). – С. 10.

113. 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.

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

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

116. Баранов, В.А. Малогабаритный цифровой термометр сопротивления / В.А. Баранов, А.А. Легошин, Н.А. Ермолаев, Вл.А. Баранов // Электронная промышленность. – 1989. – № 7. – С. 69.

117. Патент 1310855 Российская Федерация. Функциональный аналого-цифровой преобразователь / Баранов В.А., Баранов Вл.А., Ермолаев Н.А., Легошин А.А. ; заявл. 03.03.1986 ; опубл. 14.08. 1987, Бюл. № 18.

118. 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.
119. Шляндин, В.М. Цифровые измерительные преобразователи и приборы / В.М. Шляндин. – Москва : Высшая школа, 1973. – С. 185–187.
120. Михотин, В.Д. Определение частоты как измеряемой величины / В.Д. Михотин // Цифровая информационно-измерительная техника : Межвузовский сборник научных трудов. Вып. 16. – Пенза : ППИ, 1986. – С. 3–9.
121. Патент 1467519 Российская Федерация. Способ измерения частоты и устройство для его осуществления / Баранов Вл.А., Ермолаев Н.А., Легошин А.А., Франк Г.А. ; заявл. 4.10.1986 ; опубл. 15.11.1988, Бюл. № 11.
122. Патент 1597762, МКИ G 01 R23/06. Способ измерения частоты / Андреев А.Б., Баранов В.А., Баранов Вл.А. ; заявл. 05.09.1988 ; опубл. 07.10.1990, Бюл. № 37.
123. Баранов, В.А. Совершенствование фотодатчиков на основе внешнего фотоэффекта / В.А. Баранов // Датчики и системы. – 2007. – № 4. – С. 30–31.
124. Данилов, А.А. Метрологическое обеспечение измерительных систем. – 4-е издание, переработанное и дополненное / А.А. Данилов. – Санкт-Петербург : Политехника-Принт, 2017. – 146 с.
125. 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.
126. 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). – P. 042067.
127. Баранов, В.А. Моделирование взаимосвязей технологических режимов и свойств оксидного покрытия, синтезированного методом спрей-

пиролиза / В.А. Баранов, Е.А. Печерская, Т.О. Зинченко, В.В. Антипенко, Ю.А. Вареник, В.С. Александров // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 3 (33). – С. 69–77.

128. 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). – P. 055015.

129. 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. – doi: 10.21685/2227-8486-2022-3-11

130. Аналого-цифровое преобразование / под редакцией Уолта Кестнера. – Москва : Техносфера, 2007. – 1016 с.

131. Патент 2835033 С1 Российская Федерация, МПК Н03М 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.

132. Патент № 2827482 С1 Российская Федерация, МПК А61В 5/352. Способ определения показателей вариативности временных параметров электрокардиографического сигнала / Кузьмин А.В., Гасанова В.А., Пушкарева А.В., Олейников Г.К., Баранов В.А. ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный университет». – Заявка № 2023127657 ; заявл. 27.10.2023 ; опубл. 27.09.2024.

133. Патент 2459245 РФ: МПК G06F 19/00 (2011.01) Способ комплексного контроля состояния многопараметрического объекта по разнородной информации / Дюндиков Е.Т. – Заявка № 2011106222/08 от 17.02.2011 ; опубл. 20.08.2012, Бюл. № 23.

134. 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.

135. Тарбеев, Ю. Фундаментальные проблемы теоретической метрологии... / Ю. Тарбеев // Российская метрологическая энциклопедия. – Санкт-Петербург : Лики России, 2001. С.74 – 78.

136. Кнеллер, В.Ю. Преобразование физических величин: специфика, связи с другими процессами, пути решения основных задач / В.Ю. Кнеллер // Датчики и системы. – 2007. – № 12. – С. 58.

137. Богданов, А.А. Тектология: Всеобщая организационная наука / А.А. Богданов. – Москва : Финансы, 2003. – 496 с.

138. Грановский, В.А. Место метрологии в системе наук / В.А. Грановский // Датчики и системы. – 2006. – № 3. – С. 61.

139. Баранов, В.А. Философские аспекты преподавания дисциплины «Автоматизация измерений, контроля и испытаний» / В.А. Баранов, И.А. Кострикина // Университетское образование : сборник статей XIII Международной методической конференции. – Пенза, 2009. – С. 219–221.

140. 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, 18–21 апреля 2022 г.). – Самара : Самарский научный центр РАН, 2022. – С. 137–141.

141. 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 (Пенза, 16–18 марта 2020 г.) / под редакцией Е.А. Печерской. – Пенза : Пензенский государственный университет, 2020. – С. 80–82.

142. 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.

143. Крысин, Ю.М. Системный подход к аксиоматике теории измерений / Ю.М. Крысин, В.А. Баранов // Законодательная и прикладная метрология. – 2008. – № 5. – С. 61–64.

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

145. 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. 56–58.

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

147. Баранов, В.А. Обобщенный показатель неустойчивости гомеостаза технической системы / В.А. Баранов // Инженерно-физические проблемы новой техники : сборник трудов 8-ого Всероссийского совещания-семинара, МГТУ им Н.Э. Баумана. – Москва, 2006. – С. 48–49.

148. 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. Tsylin, 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.

149. Baranov, V.A. 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.

150. Степин, В.И. Системность теоретических моделей и операции их построения / В.И. Степин // Философия науки. Вып. 1: Проблемы рациональности. – Москва : ИФ РАН, 1995. – С. 26–57.

151. Фоллмер, Г. Эволюционная теория познания. Врожденные структуры познания в контексте биологии, психологии, лингвистики, философии и теории науки / Г. Фоллмер. – Москва : Русский двор, 1998. – 293 с.

152. Гегель, Г.В.Ф. Энциклопедия философских наук. Т 1. Наука логики / Г.В.Ф. Гегель. – Москва : Мысль, 1974. – 452 с.

153. Селиванов, М.Н. Формирование системы основных понятий метрологии / М.Н. Селиванов // Российская метрологическая энциклопедия / под редакцией Ю.В. Тарбеева. – Санкт-Петербург : Лики России, 2001. – С. 79–82.

154. Грановский, В.А. Системная метрология: метрологические системы и метрология систем / В.А. Грановский. – Санкт-Петербург : Изд-во ГНЦ «ЦНИИ “Электроприбор»», 1999. – 359 с.

155. Шишкин, И.Ф. Теоретическая метрология. Ч.1. Общая теория измерений / И.Ф. Шишкин. – Санкт-Петербург : Изд-во СЗТУ, 2008. – 189 с.

156. Сергеев, А.Г. Метрология / А.Г. Сергеев, В.В. Крохин. – Москва : Логос, 2000. – 406 с.

157. Тарбеев, Ю.В., Современные проблемы теоретической метрологии / Ю.В. Тарбеев, В.С. Александров, А.И. Довбета, Т.Н. Сирая // Итоги науки и техники. Серия «Метрология и измерительная техника». – Москва : ВИНТИ, 1991. – 140 с.

158. Цветков, Э.И. Основы математической метрологии / Э.И. Цветков. – Санкт-Петербург : Политехника, 2005. – 509 с.
159. Свириденко, В.М. Логико-гносеологический аспект проблемы точности измерения / В.М. Свириденко // Измерительная техника. – 1971. – № 5. – С. 15–18.
160. Пиотровский, Я. Теория измерений для инженеров : перевод с польского / Я. Пиотровский. – Москва : Мир, 1989. – 335 с.
161. Балалаев, В.А. Потенциальная точность измерений / В.А. Балалаев, В.А. Слаев, А.И. Синяков / под редакцией В.А. Слаева. – Санкт-Петербург : АНО НПО «Профессионал», 2005. – 104 с.
162. Мурашкина, Т.И. Теория измерений / Т.И. Мурашкина, В.А. Мещеряков, Е.А. Бадеева. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2003. – 168 с.
163. Крысин, Ю.М. Об основных постулатах теории измерений / Ю.М. Крысин // Информационно-измерительная техника : Межвузовский сборник научных трудов. Вып. 30. – Пенза, 2006.
164. Фихтенгольц, Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления / Г.М. Фихтенгольц. – Москва : Наука, 1969. – Т. 1.
165. Уоллард, А.Дж. Точные измерения на рабочем месте / А.Дж. Уоллард // Датчики и системы. – 2001. – № 7.
166. Кнорринг, В.Г. Принципы декомпозиции процесса измерения / В.Г. Кнорринг // Измерительная техника. – 1989. – № 7.
167. Крысин, Ю.М. Декомпозиция функции преобразования как основа структурно-алгоритмического совершенствования средств измерений / Ю.М. Крысин // Информационно-измерительная техника : Межвузовский сборник научных трудов. Вып. 26. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2002. – С. 8–13.
168. Юдин, М.Ф. Основные термины в области метрологии : словарь – справочник / М.Ф. Юдин, М.Н. Селиванов, О.Ф. Тищенко, А.И. Скороходов / под редакцией Ю.В. Тарбеева. – Москва : Изд-во стандартов, 1989. – 112 с.

169. Чертов, А.Г. Физические величины (терминология, определения, обозначения, размерности, единицы) : справочное пособие / А.Г. Чертов. – Москва : Высшая школа, 1990. – 335 с.
170. Базовая единица СИ: килограмм (кг) // Pavillon de Breteuil F-92312 Севр, Франция : [сайт]. – URL: <https://www.bipm.org/en/si-base-units/kilogram>
171. Кантор, И.А. Гиперкомплексные числа / И.А. Кантор, А.С. Солодовников. – Москва : Наука, 1973. – 144 с.
172. Lagha, Hajer Complex Permeability Measurements in a Nanocrystalline Toroidal Core / Hajer Lagha, Hafedh Belmabrouk, Hervé Chazal // Journal of Modern Materials. – 2016. – Vol. 1 (1). – P. 2–8.
173. Podgornyi, Y.V. Determination of the Steady State Leakage Current in Structures with Ferroelectric Ceramic Films / Y.V. Podgornyi, K.A. Vorotilov, A.S. Sigov // Physics of the Solid State. – 2018. – Vol. 60 (3). – P. 433–436.
174. Kumar, Arvind Impedance and ferroelectric properties of Sr²⁺ mod-ified PZT-PMN ceramics» / Arvind Kumar, S.K. Mishra // International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials. – 2014. – Vol. 21 (6). – P. 595–603.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1
ДОКУМЕНТЫ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ



Акционерное общество
«Научно – исследовательский институт
электронно-механических приборов»
(АО «НИИЭМП»)

ОКПО 07567499, ОГРН 1115834003185,
ИНН/КПП 5834054179/583401001

Адрес: Россия, 440600, г. Пенза, ул. Каракозова, 44.

E-mail: niiemp@niiemp.ru, www.niiemp.ru

Телефон: (8412) 47-71-01

факс: (8412) 94-58-25

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

АО «НИИЭМП»

В.Д. Зуев

2025 г.



АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы на
соискание степени доктора технических наук доцента, кандидата технических наук
Пензенского государственного университета
Баранова Виктора Алексеевича
на тему: «Методы и средства измерений параметров комплексного сопротивления гетерогенных объектов в рабочих режимах»

Основными результатами диссертационной работы Баранова В.А. являются:

- комбинированная модель объекта исследования в виде сочетания нелинейной электрической схемы замещения с комплексным сопротивлением и системы уравнений связи составляющих комплексного сопротивления и искомых параметров объекта;
- способы совместных измерений параметров комплексного сопротивления, частоты и амплитуды напряжения на основе пассивной измерительной схемы с минимальным числом состояний и реализующие их устройства;
- методика метрологического анализа совокупных и совместных измерений параметров комплексного сопротивления и влияющих на них физических величин.

Полученные в ходе диссертационного исследования научные результаты внедрены при выполнении ряда научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, научным руководителем, главным конструктором которых являлся Баранов В.А в период с 1985 по 2005 г.

1 Разработан и внедрен в производство измерительный преобразователь «модуль комплексного сопротивления - напряжение» для системы позиционирования луча высокопроизводительного лазерного технологического оборудования. Получены автор-

ское свидетельство № 1711094 «Преобразователь емкости датчика» и № 1762253 «Способ преобразования емкости дифференциального датчика».

2 Разработанный автором преобразователь внедрен в установках лазерной подгонки тонкопленочных резисторов (завод «РИФ», г. Воронеж).

3 Разработанный автором преобразователь внедрен в установках лазерной маркировки и объемного лазерного синтеза (Центр технологических лазеров АН СССР, г. Шатура).

4 Разработаны и внедрены в производство резисторов Р1-74 (завод «Бином», г. Владикавказ) установки для измерений сопротивления и оценивания коэффициента нелинейности высоковольтных высокоомных резисторов УВИ-1. Получен патент РФ № 2214609 «Способ измерения составляющих комплексного сопротивления двухполюсника и напряжения на нем».

5 Разработана и внедрена в производство электровакуумных приборов АО «НИИЭМП» информационно-измерительная система асинхронного сбора данных о параметрах термических технологических операций на основе разработанного автором термометра регулятора 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 выпускаемых институтом изделий.

6 Разработан и внедрен в серийное производство АО «НИИЭМП» цифровой киловольтметр СКВ-100 с диапазонами измерений напряжений постоянного и переменного тока до 100 кВ.

Заместитель генерального директора
по научно-техническому развитию,
руководитель НТС, к.т.н.



А.А. Рыжов

Начальник метрологического отдела, к.т.н.



И.А. Кострикина

Начальник лаборатории НПК-1, к.т.н.



С.А. Гурин

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель генерального директора
ОАО «НИИФИ» по научной работе
А.И. Блинов
06 2013 г.

о внедрении результатов работ по Договорам от «22» мая 2013
№ 400/235/147 и 400/235/148

Мы, нижеподписавшиеся, представитель исполнителей – директор научно-образовательного центра «Ракетно-космическое и авиационное приборостроение», профессор кафедры "Информационно-измерительная техника" ФГБОУ ВПО «ПГУ» Цыпин Борис Вульфович с одной стороны, и представитель Заказчика – начальник научно-аналитического комплекса НАК-4 ОАО "НИИФИ" Семкин Александр Николаевич, с другой стороны, составили настоящий акт о том, что результаты работ ПГУ – математические модели, алгоритмы и программы процессов обработки информации, обеспечивающие повышение точности измерений с помощью датчиков и вторичную обработку измерительной информации в системах телеметрии и локальных измерительных сетях – внедрены в ОАО «НИИФИ» путем использования их в НИР «Исследование принципов создания информационно - измерительных комплексов для высокоточных наземных аэрогазодинамических испытаний ракетно-космической техники», выполняемой по Федеральной целевой программе «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы» (мероприятие 1.4 Программы (I очередь) «Проведение проблемно-ориентированных поисковых исследований и создание научно-технического задела по перспективным технологиям в области информационно-телекоммуникационных систем»),

Работа выполнена под научным руководством профессора Б.В. Цыпина. Исполнители: доцент М.Г. Мясникова (математические модели и исследование регрессионных методов обработки измерительной информации), доцент В.А. Баранов (измерение параметров сопротивления переменному току с использованием процедуры Прони), аспирант А.В. Пупкарева (моделирование и анализ алгоритмов сжатия-восстановления измерительных сигналов), ст. преподаватель В.В. Козлов (методы обработки измерительной информации с помощью нейронных сетей).

Основными научными результатами являются программы обработки информации, обеспечивающие повышение точности измерений с помощью датчиков до 0,01%, сжатие измерительной информации в системах телеметрии и локальных измерительных сетях не менее чем в 10 раз при подавлении шумов не менее чем в 14 раз и восстановление ее с погрешностью, не превышающей десятых долей процента.

Представитель Исполнителя
Директор НОЦ РКАП



Б.В. Цыпин

Представитель Заказчика
Начальник НАК-4 ОАО "НИИФИ"



А.Н. Семкин

Российская Федерация
Общество с ограниченной ответственностью
Научно-производственная фирма



440000, г. Пенза, ул. Пушкина, 3, оф. 408
тел. +7 (841-2) 52-22-33

penzastek@yandex.ru

www.penzastek.ru

Исх. № 1326 от 15.09.2024

На. № _____ от . . .

Утверждаю:
Генеральный директор
ООО «НПФ «СТЭК», к.т.н.

А.И. Федонин

«15» сентября 2024 г.



АКТ
о внедрении результатов диссертационной работы
к.т.н., доцента Пензенского государственного университета
БАРАНОВА В.А.
МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ
ПАРАМЕТРОВ КОМПЛЕКСНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ
ГЕТЕРОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ В РАБОЧИХ РЕЖИМАХ

Результатами диссертационной работы Баранова В.А. являются:

- способы совместных измерений параметров комплексного сопротивления, частоты и амплитуды синусоидального напряжения на основе пассивной измерительной схемы в виде неуравновешенного моста;
- методика метрологического анализа совокупных и совместных измерений параметров комплексного сопротивления и влияющих на них физических величин методом статистических испытаний (методом Монте-Карло).

Данные результаты были внедрены при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в ООО «НПФ «СТЭК» в интересах ОАО «РЖД».

1. Макетный образец вторичного преобразователя составляющих комплексного сопротивления на основе неуравновешенного моста использован при сравнительной оценке действительных метрологических характеристик импортных и отечественных ёмкостных датчиков для определения качества дизельного топлива для тепловозов по значениям параметров комплексного сопротивления.
2. 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.

Ведущий метролог

С.М. Лазарев

Ведущий инженер

Д.А. Кувшинов



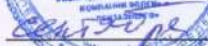
Филиал публичного акционерного общества
«Межрегиональная распределительная
сетевая компания Волги» – «Пензаэнерго»

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора

филиала «Пензаэнерго» -

главный инженер

 М.А. Кожевников
«21»  2016 г.

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы
к.т.н., доцента Пензенского государственного университета
Баранова Виктора Алексеевича

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы к.т.н. Баранова В.А. используются в метрологическом обеспечении производственного процесса филиала ПАО «МРСК Волги» - «Пензаэнерго».

При измерении нормируемых параметров высоковольтных вводов 110 кВ трансформатора С-2-Т ПС 110/6 кВ «Южная» мегаомметром М4122А применяется методика оценивания погрешности согласования с использованием калибратора электрического сопротивления КС-100KST.

Начальник службы метрологии и
контроля качества электроэнергии

 В. С. Жалдыбин

Начальник службы диагностики и
испытаний Пензенского ПО

 Д. В. Пичтарь





УТВЕРЖДАЮ

Проректор по НР и ИД
ФГБОУ ВО «ПГУ»

С.М. Васин

2025 г.

СПРАВКА

об использовании результатов диссертационной работы
Баранова Виктора Алексеевича, представленной на соискание ученой
степени доктора технических наук в научной работе
ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»

Настоящей справкой подтверждается, что результаты диссертационной работы Баранова Виктора Алексеевича, представленной на соискание ученой степени доктора технических наук на тему «Методы и средства измерений параметров комплексного сопротивления гетерогенных объектов в рабочих режимах» внедрены при реализации проекта на тему «Фундаментальные основы цифрового двойника технологического процесса формирования оксидных покрытий с заданными свойствами методом микродугового оксидирования» (госзадание Минобрнауки России по проекту № 123091800009-1, 2023 – 2025 гг.).

В.А. Баранов входит в число исполнителей данного проекта, им разработана структура и алгоритм функционирования информационно-измерительной системы для измерения параметров нелинейного комплексного сопротивления гетерогенного объекта в рабочих режимах, которые апробированы при измерении импеданса микродуговых оксидных покрытий.

Начальник НИУ

М. В. Кузнецова

Директор Политехнического
Института

Г. В. Козлов

Заведующий кафедрой ИИТиМ

Е. А. Печерская

УТВЕРЖДАЮ

Главный инженер
ФГУП "НИИЭМП"

В.Г.Недорезов



УТВЕРЖДАЮ

Ис Главный инженер
ФГУП "БИНОМ"

Ю.Г.Лашин



АКТ
сдачи-приёмки работ
по договору №

Комиссия в составе представителей ФГУП "Бином", г.Владикавказ (ЗАКАЗЧИК) Цебоева А.И.-зам.гл.инженера по науке, Воронкина Р.Ш.-зам.нач.НПК и представителей ФГУП НИИЭМП (ИСПОЛНИТЕЛЬ) Чаадаева Г.Н.-нач.НПК-4, Солодимова Г.А.-гл.метролог НИИЭМП, к.т.н., Баранов Вик.А.-нач.лаб. составили настоящий акт о том, что в том, что в соответствии с договором № 243\26 от 17.07.2000г. ФГУП "НИИЭМП" выполнила ОКР "Разработка установки для измерения сопротивления высокоомных высоковольтных резисторов" (гл.конструктор ОКР-Баранов Вик.А.).

Разработана высоковольтная измерительная установка УВИ-1 для измерения сопротивления при предельном рабочем напряжении и определения зависимости сопротивления от изменения напряжения резисторов типа Р1-74.

Основные технические характеристики установки УВИ-1:

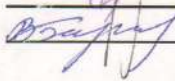
- диапазон измерения сопротивления от 22 МОм до 15 Гом;
- диапазон измерения рабочего напряжения от 1кВ до 17кВ;
- основная относительная погрешность измерения сопротивления $\pm 2\%$;
- основная относительная погрешность измерения сопротивления $\pm 2\%$.

ИСПОЛНИТЕЛЕМ изготовлены и переданы ЗАКАЗЧИКУ 2 экземпляра установки УВИ-1.

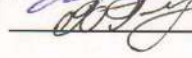
ЗАКАЗЧИК работу принял.

От ИСПОЛНИТЕЛЯ


Г.Н.Чаадаев

Г.А.Солодимова

Вик. А.Баранов

От ЗАКАЗЧИКА


А.И.Цебоев

Р.Ш.Воронкина



УТВЕРЖДАЮ

Ректор ФГБОУ ВО «ПГУ»

А. Д. Гуляков

2025 г.

СПРАВКА

об использовании результатов диссертационной работы
Баранова Виктора Алексеевича, представленной на соискание ученой
степени доктора технических наук в образовательном процессе
ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»

Настоящей справкой подтверждается использование в образовательном процессе ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет» (г. Пенза) следующих результатов диссертационной работы Баранова Виктора Алексеевича, представленной на соискание ученой степени доктора технических наук:

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

Заведующий кафедрой ИИТиМ

Е. А. Печерская

Декан ФИТЭ

В. Д. Кревчик

Директор Политехнического
института

Г. В. Козлов

Согласовано
Зам. Генерального директора
ФГУП «НИИЭМП» по производству
А.Н.Шестернин
« 19 » 12 2003 г.



Утверждаю
Главный инженер
ФГУП «НИИЭМП»
В.Г.Недорезов
« 12 » 2003 г.

Акт

приемки ОКР «Разработка комплекта устройств для измерения, регулирования и регистрации температуры в ходе технологических процессов производства ИЭТ»

Шифр «Термометр -2003»

г. Пенза

Приемочная комиссия в составе:
Председателя комиссии Коновяченко М.А.
и членов комиссии: Солодимовой Г.А., гл. метролог ФГУП «НИИЭМП», Кольмакова Е.Б. (ПЭО), Трегубовой Н.В. (бухгалтерия), Змеева С.А. (О-22), Баранова В.А., руководитель работы (О-43), действующая на основании приказа Генерального директора ФГУП «НИИЭМП» от 8.12.03 г. № 228 составила настоящий акт в следующем:

1. Комиссия в период с 16.12.2003г. по 18.12.2003 г. провела приемку ОКР «Разработка комплекта устройств для измерения, регулирования и регистрации температуры в ходе технологических процессов производства ИЭТ», выполненной ФГУП «НИИЭМП» в соответствии с планом инициативных работ на 2003 г.
2. Комиссии были предъявлены:
приказ Генерального директора № 161 от 25.8.2003;
техническое задание, утвержденное в установленном порядке;
плановая и сметная документация на проведение работы;
приказ Генерального директора № 228 от 8.12.2003;
расчет экономической эффективности внедрения комплекта в НПК-2;
комплект устройств в составе: измеритель — регулятор температуры — 10 шт.,
блок сопряжения с IBM PC — 1 шт.,
регистратор информации электронный — 1 шт.,
пакет программ пользователя Тепмогег;
- комплект принципиальных схем и конструкторская документация на печатные платы измерителя - регулятора;

- паспорт на измеритель – регулятор температуры, совмещенный с инструкцией по эксплуатации.

3. Ознакомившись с предъявленными материалами, комиссия установила:

- разработан и изготовлен в одном экз. комплект устройств для регулирования, измерения и регистрации температуры на основе термоэлектрического преобразователя типа ХА. В комплект входят измеритель – регулятор температуры с регистрацией результатов измерений (10 шт.), автономный регистратор цифровой информации (1 шт.), блок сопряжения (1 шт.), пакет программ пользователя Termpogeg;

- технические характеристики разработанных устройств соответствуют требованиям технического задания;

- комплект позволяет заменить морально устаревшие приборы Ц4501 и КСН;

- комплект позволяет обеспечить снижение эксплуатационных расходов на регистрацию хода технологической операции (расходные материалы, поверка самописцев);

- срок полезного использования комплекта составляет 10 лет

- опытный образец комплекта устройств, разработанных в ходе ОКР «Термометр-2003» передан в опытную эксплуатацию в НПК-2 с 10.12.2003г.

- фактические расходы по теме составили 63,6 тыс. руб. против сметной стоимости 150,0 тыс. руб.;

- экономическая выгода (эффект) от внедрения составляет 81,2 тыс. руб.

4. Комиссия постановила:

- считать ОКР теме «Термометр - 2003» выполненной в соответствии с техническим заданием и принятой;

- считать комплект устройств, разработанный и изготовленный в ходе ОКР «Термометр - 2003», принятым в опытную эксплуатацию в НПК - 2 с «10» декабря 2003г.;

- установить срок списания расходов один год с января 2004 г., способ списания линейный.

5. Комиссия рекомендует:

- в соответствии с заявкой НПК-2 О-43 разработать план работ по дооснащению НПК-2 измерителями-регуляторами температуры, включающий график передачи приборов с указанием типов датчика и исполнительного устройства;

- разработать полные комплекты конструкторской и технологической документации на комплект устройств с учетом различий в конструкциях корпусов заменяемых приборов;

- с целью измерения нестабильности метрологических характеристик прибора в течение 6 месяцев с начала опытной эксплуатации ежемесячно определять погрешности измерения температуры;

- рассмотреть возможность съема информации с нескольких (5 и более) приборов одним регистратором с вводом её в компьютер за один цикл;

- провести для измерителя-регулятора процедуру утверждения типа средства измерений с введением в Госреестр РФ;

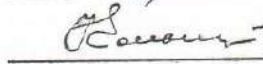
- после введения прибора в Госреестр ввести комплект устройств в технологическую документацию на изделия НПК-2;
- для получения полного эффекта от результатов ОКР «Термометр-2003» за счет внедрения в НПК-2 статистических методов управления качеством продукции выделить для сбора и обработки информации о технологических процессах отдельный компьютер IBM PC Pentium;
- проработать вопрос о ринке сбыта перед Внешним потребителем.

Председатель комиссии

 18.12.03 М.А. Коновченко

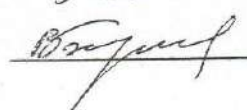
Члены комиссии

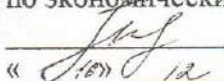
 Г.А. Солодимова

 Е.Б. Кольмаков

 Н.В. Трегубова

 С.А. Змеев

 В.А. Баранов

УТВЕРЖДАЮ
Зам генерального директора
по экономическим вопросам
 Н.А. Медведева
« 16 » 12 2003 г.

**Расчет экономической выгоды (дохода)
от использования результатов работы**

**«Разработка комплекта устройств для измерения, регулирования и регистра-
ции температуры в ходе технологических процессов»
Шифр «Термометр – 2003»**

В О – 43 в соответствии с приказом генерального директора № 161 от 25.08.03 про-
ведена в интересах НПК – 2 разработка комплекта устройств для измерения, регулирова-
ния и регистрации температуры в ходе технологических процессов. В базовом варианте в
состав комплекта входят 10 приборов типа МИРТ – 1. Прибор МИРТ – 1 заменяет выпро-
тававшие свой ресурс самопишущие приборы типа КСП, используемые для регулирования и
регистрации процессов термической обработки деталей вакуумных приборов.

Оценка экономических выгод от внедрения в НПК – 2 комплекта устройств, разра-
ботанного и изготовленного в результате работы «Термометр – 2003» в соответствии с п.
1.4 «Методических рекомендаций по определению экономической выгоды (дохода) пред-
приятия от использования результатов научно – исследовательских, опытно – конст-
рукторских и технологических работ, выполняемых по плану инициативных работ предпри-
ятия» проводится сравнением стоимостных показателей разработанного оборудования с
зарубежными и отечественными аналогами (сравнительной стоимостью расходов на его
приобретение для оснащения технологического процесса).

Экономическая выгода от разработки комплекта за счет проектирования и изготов-
ления собственными силами определена в соответствии с п.3.4 «Методических рекомен-
даций...»:

$$Э_{\text{се}} = (C_a - Z_{\text{изг.}}) \times N - Z_{\text{пр.}}$$

где $Э_{\text{се}}$ – экономическая выгода от использования оборудования собственного изготовле-
ния; C_a – стоимость аналога, $Z_{\text{изг.}}$ – расходы на изготовление единицы оборудования соб-
ственными силами, N – количество единиц оборудования, необходимое для оснащения
технологического процесса изготовления продукции. $Z_{\text{пр.}}$ – расходы на проектирование.

На данный момент стоимость аналога составляет 15 тыс. руб.

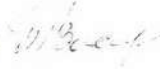
Себестоимость изготовления прибора МИРТ – 1 составляет 5 тыс. рублей.

Фактические расходы на проектирование составили 18,8 тыс. рублей.

Для оснащения НПК – 2 необходимо 10 приборов МИРТ – 1.

Экономическая выгода составила

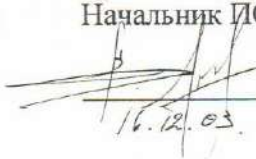
$$(15,0 - 5,0) \times 10 - 18,8 = 81,2 \text{ тыс. рублей}$$

Экономист О – 43  Т.А. Васильева

Руководитель работы  В.А. Баранов

Согласовано

Начальник ПО

 В.В. Дубровский

16.12.03.

Согласовано
Зам. Генерального директора
ФГУП «НИИЭМП» по производству
 А.Н.Шестернин
« 28 » 11 2004 г.



Главный инженер
ФГУП «НИИЭМП»
В.Г.Недорезов
« 11 » 11 2004 г.

АКТ

приемки ОКР «Разработка системы регистрации данных о ходе технологических процессов производства ИЭТ с целью организации статистического управления качеством продукции»

Шифр «Регистрация - 2004»

г. Пенза

Приемочная комиссия в составе:

Председателя комиссии Коновченко М.А. и членов комиссии: Солодимовой Г.А., гл. метролог ФГУП «НИИЭМП», Кольмакова Е.Б. (ПЭО), Евсеевой Т.П. (бухгалтерия), Змеева С.А. (О-22), Баранова В.А., руководитель работы (О-43), действующая на основании приказа Генерального директора ФГУП «НИИЭМП» от 11.04 г. № 209 составила настоящий акт в следующем:

1. Комиссия в период с 24.11.2003г. по 26.11.2004 г. провела приемку ОКР «Разработка системы регистрации данных о ходе технологических процессов производства ИЭТ с целью организации статистического управления качеством продукции», выполненной ФГУП «НИИЭМП» в соответствии с планом инициативных работ на 2004 г.

2. Комиссии были предъявлены:

- приказ Генерального директора № 76 от 25.04.2004;
- техническое задание, утвержденное в установленном порядке;
- плановая и сметная документация на проведение работы;
- приказ Генерального директора № 209 от 24.11.2004;
- расчет экономической эффективности внедрения комплекта в НПК-2;
- комплект технологического оборудования в составе:
 - термометр «МИРТ -1 – 30 шт.,
 - блок сопряжения с IBM PC – 1 шт.,
 - регистратор информации электронный – 10 шт.,

пакет программ пользователя Тегмогег;
 комплект конструкторской документации на термометр регулирующий «МИРТ-1»;
 руководство по эксплуатации термометра регулирующего «МИРТ-1».

3. Ознакомившись с предъявленными материалами, комиссия установила:

- разработан и изготовлен в одном экз. комплект устройств для регулирования, измерения и регистрации температуры на основе термоэлектрического преобразователя типов ХА, ХК, ВР, ПП, ТСП. В комплект входят термометр регулирующий (30 шт.), автономный регистратор цифровой информации (10 шт.), блок сопряжения (1 шт.), пакет программ пользователя Тегмогег;
- технические характеристики разработанных устройств соответствуют требованиям технического задания;
- комплект позволяет заменить морально устаревшие приборы ПЦ4501 соответствующих модификаций и КСП;
- комплект позволяет обеспечить снижение эксплуатационных расходов на регистрацию хода технологической операции (расходные материалы, проверка самописцев);
- срок полезного использования комплекта составляет 10 лет
- опытный образец комплекта устройств, разработанных в ходе ОКР «Регистрация-2004» передан в опытную эксплуатацию в НПК-2 с 15.11.2004 г.
- фактические расходы по теме составили 151,8 тыс. руб. против сметной стоимости 188,16 тыс. руб.;
- экономическая выгода (эффект) от внедрения составляет 296,8 тыс. руб.

4. Комиссия постановила:

- считать ОКР «Регистрация - 2004» выполненной в соответствии с техническим заданием и принятой;
- считать комплект устройств, разработанный и изготовленный в ходе ОКР «Регистрация- 2004», принятым в опытную эксплуатацию в НПК - 2 с «15» ноября 2004г.;
- установить срок списания расходов один год с января 2005 г., способ списания линейный.

5. Комиссия рекомендует:

- провести для термометра регулирующего «МИРТ-1» процедуру утверждения типа средства измерений с введением в Госреестр РФ;
- после введения прибора в Госреестр ввести комплект устройств в технологическую документацию на изделия НПК-2;
- для получения полного эффекта от результатов ОКР «Регистрация-2004» в НПК-2 организовать сбор и накопление информации о термических технологических операциях, а О-43 провести работы по разработке методик и программного обеспечения статистических методов управления качеством вакуумных ИЭТ;

- О-43 при разработке системы измерений и регистрации давления в вакуумных ИЭТ обеспечить максимальную унификацию системотехнических, конструктивных и программных решений с внедренной в НПК-2 системой сбора данных о термических операциях и проработать вопрос о создании единой системы сбора данных о всех критических параметрах технологического процесса производства вакуумных ИЭТ.

Председатель комиссии

 М.А. Коновченко

Члены комиссии

 Г.А. Солодимова

 Е.Б. Кольмаков

_____ Т.П. Евсеева

 С.А. Змеев

 В.А. Баранов

Приложение 2
Объекты интеллектуальной собственности

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2827482

**СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
ВАРИАТИВНОСТИ ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ
ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАФИЧЕСКОГО СИГНАЛА**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Пензенский государственный университет" (ФГБОУ ВО "ПГУ") (RU)*

Авторы: *Кузьмин Андрей Викторович (RU), Гасанова Вероника Алексеевна (RU), Пушкарева Анастасия Валерьевна (RU), Олейников Глеб Константинович (RU), Баранов Виктор Алексеевич (RU)*

Заявка № **2023127657**

Приоритет изобретения **27 октября 2023 г.**

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации **27 сентября 2024 г.**

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает **27 октября 2043 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

документ подписан электронной подписью

Сертификат: 0692e7e106300b154f2401670b0cc2026

Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**

Действителен с 10.07.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2214609

Российским агентством по патентам и товарным знакам на основании Патентного закона Российской Федерации, введенного в действие 14 октября 1992 года, выдан настоящий патент на изобретение

**СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ КОМПЛЕКСНОГО
СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВУХПОЛЮСНИКА
И НАПРЯЖЕНИЯ НА НЕМ**

Патентообладатель(ли):

*Федеральное государственное унитарное предприятие
Научно-исследовательский институт
электро-механических приборов*

по заявке № 2001124545, дата поступления: 04.09.2001

Приоритет от 04.09.2001

Автор(ы) изобретения:

см. на обороте

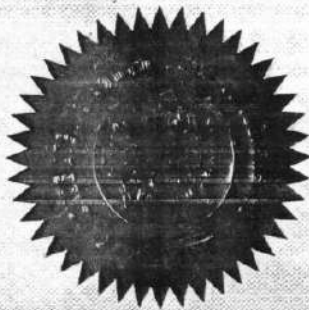
Патент действует на всей территории Российской Федерации в течение 20 лет с 4 сентября 2001 г. при условии своевременной уплаты пошлины за поддержание патента в силе

Зарегистрирован в Государственном реестре изобретений Российской Федерации

г. Москва, 20 октября 2003 г.

Генеральный директор

А.Д. Корнягин



СОЮЗ СОВЕТСКИХ СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ РЕСПУБЛИК

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР
ПО ДЕЛАМ ИЗОБРЕТЕНИЙ И ОТКРЫТИЙ

АВТОРСКОЕ СВИДЕТЕЛЬСТВО

№ 1404845

На основании полномочий, предоставленных Правительством СССР,
Государственный комитет СССР по делам изобретений и открытий
выдал настоящее авторское свидетельство на изобретение:
"Устройство для измерения температуры"

Автор (авторы): Летошин Анатолий Анатольевич, Баранов
Виктор Алексеевич, Баранов Владимир Алексеевич и
Ермолаев Николай Александрович

Заявитель:

Заявка № 4164544 Приоритет изобретения 22 декабря 1986г.

Зарегистрировано в Государственном реестре
изобретений СССР
22 февраля 1988г.

Действие авторского свидетельства распро-
страняется на всю территорию Союза ССР.

Председатель Комитета

Начальник отдела

МПФ Госзнака. 1979. Зак. 70-3083.



СОЮЗ СОВЕТСКИХ СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ РЕСПУБЛИК
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО ИЗОБРЕТЕНИЯМ И ОТКРЫТИЯМ
ПРИ ГОСУДАРСТВЕННОМ КОМИТЕТЕ СССР ПО НАУКЕ И ТЕХНИКЕ
(ГОСКОМИЗОБРЕТЕНИЙ)

АВТОРСКОЕ СВИДЕТЕЛЬСТВО

№ 1538062

На основании полномочий, предоставленных Правительством СССР,
Госкомизобретений выдал настоящее авторское свидетельство
на изобретение:
"Цифровой термометр"

Автор (авторы): Баранов Виктор Алексеевич, Баранов
Владимир Алексеевич, Ермолаев Николай Александрович и
Легошин Анатолий Анатольевич

Заявитель:

Заявка № 4375892 Приоритет изобретения 10 декабря 1987 г.
Зарегистрировано в Государственном реестре
изобретений СССР

15 сентября 1989 г.
Действие авторского свидетельства распро-
страняется на всю территорию Союза ССР.

Председатель Комитета

Начальник отдела

Ю. Зелен
Зинин




СОЮЗ СОВЕТСКИХ СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ РЕСПУБЛИК

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР
ПО ДЕЛАМ ИЗОБРЕТЕНИЙ И ОТКРЫТИЙ

АВТОРСКОЕ СВИДЕТЕЛЬСТВО

№ 1310855

На основании полномочий, предоставленных Правительством СССР,
Государственный комитет СССР по делам изобретений и открытий
выдал настоящее авторское свидетельство на изобретение:
"Функциональный аналого-цифровой преобразователь"

Автор (авторы): Легошин Анатолий Анатольевич, Ермолаев
Николай Александрович, Баранов Владимир Алексеевич и
Баранов Виктор Алексеевич

Заявитель:

Заявка № 4024702 Приоритет изобретения 20 февраля 1986 г.
Зарегистрировано в Государственном реестре
изобретений СССР

15 января 1987 г.
Действие авторского свидетельства распро-
страняется на всю территорию Союза ССР.

Председатель Комитета *Налин*

Начальник отдела *Антонин*





СОЮЗ СОВЕТСКИХ СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ РЕСПУБЛИК
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО ИЗОБРЕТЕНИЯМ И ОТКРЫТИЯМ
ПРИ ГОСУДАРСТВЕННОМ КОМИТЕТЕ СССР ПО НАУКЕ И ТЕХНИКЕ
(ГОСКОМИЗОБРЕТЕНИЙ)

АВТОРСКОЕ СВИДЕТЕЛЬСТВО

№

1711094

На основании полномочий, предоставленных Правительством СССР, Госкомизобретений выдал настоящее авторское свидетельство на изобретение:

"Преобразователь емкости датчика"

Автор (авторы): Баранов Виктор Алексеевич и другие,
указанные в описании

Заявитель: НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОННО-МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Заявка № 4761616 Приоритет изобретения 21 ноября 1989г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений СССР

8 октября 1991г.

Действие авторского свидетельства распространяется на всю территорию Союза ССР.

Председатель Комитета

Начальник отдела

Ю. В. Селев
Зиня





СОЮЗ СОВЕТСКИХ СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ РЕСПУБЛИК
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО ИЗОБРЕТЕНИЯМ И ОТКРЫТИЯМ
ПРИ ГОСУДАРСТВЕННОМ КОМИТЕТЕ СССР ПО НАУКЕ И ТЕХНИКЕ
(ГОСКОМИЗОБРЕТЕНИЙ)

АВТОРСКОЕ СВИДЕТЕЛЬСТВО

№

1597762

На основании полномочий, предоставленных Правительством СССР,
Госкомизобретений выдал настоящее авторское свидетельство
на изобретение:
"Способ измерения частоты"

Автор (авторы): Баранов Виктор Алексеевич, Андреев
Анатолий Борисович и Баранов Владимир Алексеевич

Заявитель:

Заявка №

4480404

Приоритет изобретения 5 сентября 1988г.
Зарегистрировано в Государственном реестре
изобретений СССР

8 июня 1990г.

Действие авторского свидетельства распро-
страняется на всю территорию Союза ССР.

Председатель Комитета

Начальник отдела

Ю. В. Алексеев
Зинин





СОЮЗ СОВЕТСКИХ СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ РЕСПУБЛИК

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР
ПО ДЕЛАМ ИЗОБРЕТЕНИЙ И ОТКРЫТИЙ

АВТОРСКОЕ СВИДЕТЕЛЬСТВО

№ 1467519

На основании полномочий, предоставленных Правительством СССР,
Государственный комитет СССР по делам изобретений и открытий
выдал настоящее авторское свидетельство на изобретение:
**"Способ измерения частоты и устройство для его
осуществления"**

Автор (авторы): Баранов Виктор Алексеевич, Ермолаев
Николай Александрович, Баранов Владимир Алексеевич,
Легошин Анатолий Анатольевич и Франк Геннадий
Александрович

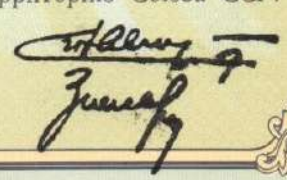
Заявитель:

Заявка № 4131071 Приоритет изобретения 4 октября 1986г.
Зарегистрировано в Государственном реестре
изобретений СССР

15 ноября 1988г.
Действие авторского свидетельства распро-
страняется на всю территорию Союза ССР.

Председатель Комитета

Начальник отдела



СОЮЗ СОВЕТСКИХ СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ РЕСПУБЛИК
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО ИЗОБРЕТЕНИЯМ И ОТКРЫТИЯМ
ПРИ ГОСУДАРСТВЕННОМ КОМИТЕТЕ СССР ПО НАУКЕ И ТЕХНИКЕ
(ГОСКОМИЗОБРЕТЕНИЙ)

АВТОРСКОЕ СВИДЕТЕЛЬСТВО

№ 1762263

На основании полномочий, предоставленных Правительством СССР, Госкомизобретений выдал настоящее авторское свидетельство на изобретение:

"Способ преобразования емкости дифференциального датчика"

Автор (авторы): Баранов Виктор Алексеевич и другие,
указанные в описании

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОННО-МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Заявитель:

Заявка № 4761028 Приоритет изобретения 21 ноября 1989г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений СССР

15 мая 1992г.

Действие авторского свидетельства распространяется на всю территорию Союза ССР.

Председатель Комитета

Начальник отдела

Расс
Зинин