На правах рукописи

Ермошин Николай Иванович

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Томск – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Гольдштейн Александр Ефремович

Официальные оппоненты: **Смирнов Геннадий Васильевич**
доктор технических наук, профессор,
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», профессор кафедры радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга.

Поляков Виктор Владимирович
доктор технических наук, профессор,
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Алтайский государственный университет», г. Барнаул, заведующий кафедрой информационной безопасности.

Защита диссертации состоится «21» сентября 2021 года в 15:00 на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.13 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: dis.tpu.ru

Автореферат разослан «___»_____ 2021 года

Ученый секретарь
диссертационного совета ДС.ТПУ.13
к.т.н., доцент Шевелева Е.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Кабели, шнуры, провода являются одними из самых востребованных изделий, применяемых в радиотехническом, электрическом и электронном оборудовании. В современном мире ни одно техническое устройство не сможет работать без кабелей и проводов. Эксплуатация кабельных изделий происходит в различных средах: в космосе, под землей, под водой; под воздействием температуры, проникающих излучений, химических веществ, механических нагрузок. Кабельная продукция подвергается большому количеству испытаний, цель которых оценить качество изготовленных кабелей и проводов. Одним из таких испытаний является измерение сопротивления изоляции кабеля. Приборы, применяемые для измерения сопротивления изоляции кабеля, называют тераомметрами.

Основными характеристиками тераомметра являются верхний предел измерения, рабочее напряжение, быстродействие, погрешность измерения.

Согласно ГОСТ 3345-76 напряжение для контроля сопротивления изоляции кабельных изделий должно быть от 100 до 1000 В. Погрешность измерения не более 10 % в диапазоне до 10^{10} Ом, 20 % в диапазоне до 10^{14} Ом, 25 % в диапазоне свыше 10^{14} Ом. Отсчеты значений электрического сопротивления изоляции при измерении проводят по истечению 1 мин. с момента приложения измерительного напряжения к образцу, но не более чем через 5 мин., если в стандартах или технических условиях на конкретные кабельные изделия не предусмотрены другие требования.

В настоящее время на рынке имеются тераомметры с верхним пределом измерения сопротивления до 10^{6} ТОм. В большинстве случаев требуемая точность и быстродействие в них обеспечивается высоким опорным напряжением и экранированием объекта контроля.

На быстродействие и погрешность прибора существенное влияние оказывает электрическая емкость кабельных изделий. В то время как приведенные в технической документации характеристики приборов справедливы для измерения активного сопротивления. Наличие емкостной составляющей увеличивает время установления показаний прибора в десятки и более раз, что в большинстве случаев не соответствует требованиям ГОСТ 3345-76.

Другой существенный фактор, влияющий на контроль сопротивления изоляции кабельных изделий – внешние электромагнитные помехи промышленной частоты (50 Гц) и низкочастотные помехи (десятые доли – единицы Гц). И если от помех промышленной частоты имеется возможность избавиться интегрированием за оптимальный период времени, то для подавления непериодических низкочастотных помех необходим другой подход. Минимизировать данные помехи можно при экранировании объекта контроля, но такой подход сложно применить к кабельным изделиям в производственных условиях. Так, например, в некоторых приборах предусмотрены специальные измерительные камеры, но они позволяют работать только с образцом кабеля.

Поэтому исследования, направленные на разработку методов по минимизации влияния низкочастотных помех и электрической емкости кабеля на быстродействие и погрешность средств контроля сопротивления изоляции, являются актуальными.

Степень научной проработанности темы.

Исследованиям по контролю сопротивления изоляционных материалов посвящено немалое количество работ отечественных и зарубежных ученых. Особое внимание в них уделено вопросам разработки новых методов увеличения верхнего предела измерения, быстродействия, точности и помехозащищенности средств контроля.

В работе И.М. Бородянского разработаны емкостный и резистивный методы контроля сопротивления изоляции в электрических цепях под напряжением. Методы обладают высоким быстродействием в большей степени из-за того, что используется относительно небольшой предел измерения (до 5 МОм).

Существенных результатов в вопросе повышения быстродействия средств контроля сопротивления, при работе с объектами, имеющими большую емкость, добился Е.В. Якимов. Результат был получен методом введения ключевого элемента в инвертирующий операционный усилитель. Данный метод эффективен, но требует доработки в плане защиты от низкочастотных помех.

Значительный вклад в разработку и совершенствование методов контроля сопротивления изоляционных материалов внесли И.М. Бородянский, В.И. Лачин, К.Ю. Соломенцев, С.Л. Эпштейн, Е.В. Якимов.

Определенное влияние, на решение проблемы помехозащищенности средств контроля сопротивления изоляции оказали М.Х. Ансо, И.М. Бородянский, М.П. Пярн, О.В. Сакс, В.Г. Шор. Однако эти работы не могут быть применены в непосредственном виде, когда объектом контроля является изоляция кабельных изделий, потому что кабель обладает большой емкостной составляющей, которая повышает чувствительность тераомметра к внешним помехам, что приводит к увеличению погрешности измерения.

Таким образом, выявленные недостатки существующих методов контроля сопротивления изоляции кабельных изделий, требуют усовершенствования старых методов и средств, либо создания новых.

Объект исследования – средства контроля сопротивления изоляции кабельных изделий.

Предмет исследования – методы построения средств контроля сопротивления изоляции кабельных изделий.

Цель диссертационной работы – разработка и усовершенствование методов и средств контроля сопротивления изоляции кабельных изделий с техническими характеристиками (опорное напряжение, верхний предел измерения, погрешность и быстродействие), удовлетворяющими требованиям ГОСТ 3345-76 на пределах измерения более 1 ТОм.

Для достижения указанной цели были сформулированы следующие **задачи**:

– разработать методы и средства контроля сопротивления изоляции кабельных изделий при ограниченном значении опорного напряжения (100 В);

– разработать технические решения по повышению быстродействия, средств контроля сопротивления изоляции кабельных изделий;

– разработать технические решения для уменьшения влияния помех на процесс контроля сопротивления изоляции кабельных изделий без применения специальных средств экранирования объекта контроля;

– реализовать разработанные технические решения в виде средства контроля сопротивления изоляции кабельных изделий.

Научная новизна диссертационной работы заключается в том, что

– предложена методика выбора параметров одноканального преобразователя сопротивления в напряжение (ПСН) с Т-образной обратной связью, которые позволяют значительно увеличить быстродействие и точность тераомметра при контроле сопротивления изоляции кабельных изделий;

– предложен метод компенсации низкочастотных помех при контроле сопротивления изоляции кабельных изделий на базе двухканальной схемы ПСН с Т-образной обратной связью;

– разработана аппаратно-программная реализация алгоритма обработки сигнала двухканальной схемы ПСН, основанная на вычитании низкочастотных помех с оценкой параметров помехи по минимальным и максимальным отклонениям значения сигнала.

Практическая ценность работы состоит в том, что

1) предложенные технические решения позволяют обеспечить в разработанном приборе установленные требованиями ГОСТ 3345-76 характеристики;

2) предложенный метод компенсации низкочастотных помех и помех промышленной частоты при контроле сопротивления изоляции кабельных изделий на основе двухканальной схемы ПСН с Т-образной обратной связью позволяет решить задачу повышения быстродействия, помехозащищенности, точности измерения и может быть использован разработчиками средств контроля сопротивления изоляции кабельных изделий.

Методы исследования.

При выполнении настоящей работы использованы методы цифровой обработки сигналов, теории электрических цепей, теории измерений, математического моделирования с использованием пакетов прикладных программ MathCad, Altium Designer, LabView.

Положения, выносимые на защиту:

– схема одноканального ПСН тераомметра на основе инвертирующего усилителя с интегратором в первом каскаде, ФНЧ во втором и Т-образной обратной связью позволяет уменьшить номинал образцового сопротивления более чем в 100 раз;

– схема одноканального ПСН тераомметра с Т-образной обратной связью позволяет увеличить быстродействие до 3 раз при контроле сопротивления

изоляции кабелей с высокой емкостью по сравнению с ПСН с классическим вариантом обратной связи;

– метод компенсации низкочастотных помех при контроле сопротивления изоляции кабельных изделий на базе двухканальной схемы ПСН с Т-образной обратной связью и алгоритмом обработки сигналов с оценкой параметров помехи по минимальным и максимальным отклонениям значений сигналов, позволяет обеспечить помехозащищенность до 3,7 раз лучше, чем одноканальный ПСН с усредняющим фильтром.

Личный вклад автора заключается в личном участии на всех этапах работы: формулировка цели и задач работы, подготовка экспериментальных стендов, проведение теоретических и экспериментальных исследований, обработка и интерпретация полученных результатов, формулировка заключений и выводов, подготовка научных публикаций по теме исследования.

Достоверность результатов работы обеспечивается большим объемом экспериментальных данных, сходимостью теоретических и экспериментально полученных зависимостей, непротиворечивостью результатам исследований других авторов.

Апробация работы.

Материалы, вошедшие в диссертацию, были обсуждены на следующих российских и международных конференциях:

– VII Научно-практическая конференция «Информационно-измерительная техника и технологии» с международным участием, г. Томск, 25-28 мая 2016 г.

– VI, VII, IX Международные конференции школьников, студентов, аспирантов и молодых ученых «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее», г. Томск, 2017 г., 2018 г., 2020 г.

– IV Международная конференция «Инновации в неразрушающем контроле (SibTest 2017)», г. Новосибирск, 27-30 июня 2017 г.

– V Международная конференция «Инновации в неразрушающем контроле (SibTest 2019)», г. Екатеринбург, 26-28 июня 2019 г.

Публикации.

По результатам выполненных исследований опубликовано 12 работ, в том числе 5 статей в международных журналах, индексируемых в базе данных Scopus и Web of Science, 6 докладов и тезисов в материалах Международных и Всероссийских научных конференций, получен 1 патент РФ на изобретение.

Структура и объем диссертационной работы.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы из 73 наименований, 3 приложений, содержит 110 страниц текста, 62 рисунка и 8 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цель и задачи исследования, сформулированы научная новизна и

практическая ценность результатов исследования, представлены основные положения, выносимые на защиту и описана структура работы.

В первой главе представлен обзор методов и средств контроля сопротивления изоляции кабельных изделий. Приведены схемы измерения, реализующие предложенные методы и описаны их достоинства и недостатки. Представлены характеристики современных средств контроля сопротивления изоляции кабельных изделий.

Главным преимуществом методов непосредственной оценки является простота реализации устройства и достаточно высокий предел измерения. Из недостатков выделяется низкое быстродействие и необходимость экранирования объекта контроля для обеспечения точности измерений сопротивления.

Мостовые методы практически не используются при контроле сопротивления изоляции кабельных изделий, потому что имеют низкий предел измерения, высокую погрешность и плохую помехозащищенность.

На основе метода вольтметра-амперметра разработано большое количество зарубежных средств контроля, но в большинстве случаев выпускаемые приборы имеют очень большую погрешность измерений, которая либо превышает допустимое значение, установленное требованием ГОСТ 3345-76, либо принимает его граничное значение. Также к недостаткам относится высокое опорное напряжение на верхних пределах измерения.

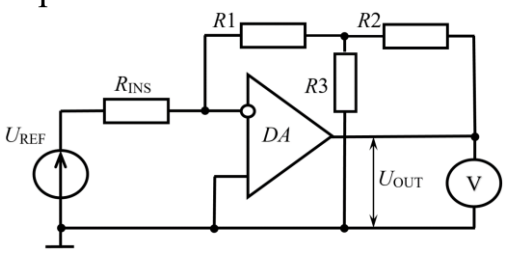
Метод заряда-разряда конденсатора обладает наилучшим быстродействием, среди существующих методов. На его основе выпускается большое количество современных приборов. К недостаткам метода относится высокое опорное напряжение и большая погрешность измерения.

Из проведенного исследования сделан вывод о наиболее перспективном методе на основе преобразователя сопротивления в напряжение с интегратором в первом каскаде. Основной недостаток метода свойственен всем выше приведенным – это плохая защищенность от помех низкой частоты. Также требуются исследования по увеличению быстродействия метода.

В первой части **второй главы** рассмотрены особенности применения Т-образной обратной связи в тераомметрах.

Приведен обзор операционных усилителей (ОУ), которые имеют наименьший входной ток, что позволяет увеличить верхний предел измерения сопротивления. Представлено обоснование достоинств Т-образной обратной связи, которая позволяет уменьшить номинал образцового резистора, и, соответственно, его погрешность.

На рисунке 1 представлена простейшая схема ПСН с Т-образной образной обратной связью.



DA – операционный усилитель; U_{REF} – источник опорного напряжения; R_{INS} – сопротивление изоляции; *R1*, *R2*, *R3* – сопротивления Т-образной связи; U_{OUT} – выходное напряжение ПСН; V – вольтметр

Рисунок 1 – ПСН с Т-образной обратной связью

Для определения теоретического значения выходного напряжения тераомметра $U_{OUT(T)}$, учитывающего большинство параметров ОУ, был применен пакет программ Altium Designer. Для расчета теоретических значений выходного напряжения тераомметра $U_{OUT(ID)}$ при идеальном ОУ использовано известное выражение:

$$U_{OUT(ID)} = -U_{REF} \cdot \frac{R1 + R2 + \frac{R1 \cdot R2}{R3}}{R_{INS}} = -U_{REF} \cdot \frac{R_{EQ}}{R_{INS}}, \qquad (1)$$

где U_{REF} – источник опорного напряжения; $R1$, $R2$, $R3$ – сопротивления Т-образной связи; R_{INS} – сопротивление изоляции; R_{EQ} – эквивалентное сопротивление обратной связи усилителя.

Уравнение (1) не учитывает многие параметры ОУ (входное сопротивление и ток, напряжение смещение нуля, конечный коэффициент усиления, наличие защиты от статического электричества и др.), которые ограничивают применение совместно с ним Т-образной обратной связи для построения тераомметра. Для того чтобы учесть приведенные параметры ОУ, был выполнен анализ в программе симуляции электрических схем.

На рисунке 2 представлена электрическая схема исследуемого тераомметра в программе симуляции Altium Designer.

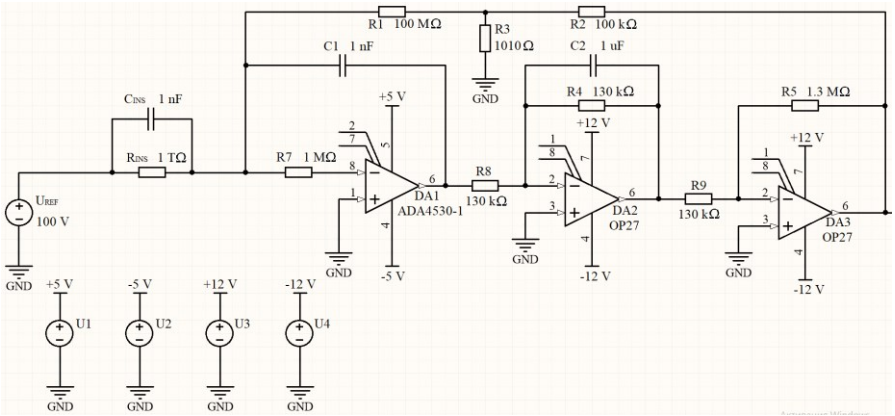


Рисунок 2 – Электрическая схема исследуемого тераомметра в программе симуляции Altium Designer

В ходе моделирования электрической схемы исследуемого тераомметра установлено, что выходное напряжение преобразователя с Т-образной обратной связью $U_{OUT(T)}$ не зависит от сочетания сопротивлений $R2$ и $R3$, при условии, что они обеспечивают одинаковое эквивалентное сопротивление R_{EQ}.

В то же время, изменение номинала сопротивления $R1$ оказывает влияние на выходной сигнал.

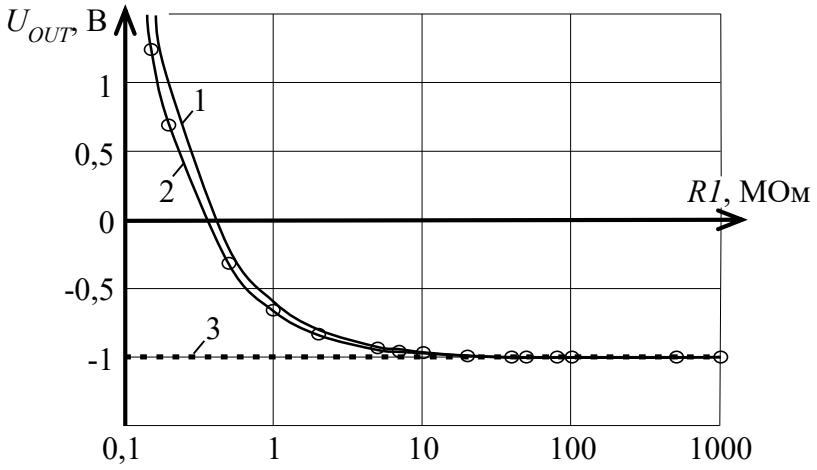
Из полученных в результате моделирования данных сделан вывод, что уменьшение образцового сопротивления $R1$ по отношению к R_{EQ} кратно увеличивает напряжение смещения входного ОУ ($R3$ слишком мало относительно $R1$ и им можно пренебречь). Утверждение выражается следующей формулой:

$$U_{OUT.OF} = \frac{R_{EQ}}{(R1 + R3)} \cdot U_{OF}, \qquad (2)$$

где $U_{OUT.OF}$ – смещение выходного напряжения ПСН с Т-образной обратной связью; U_{OF} – напряжение смещения ОУ.

Моделирование показывает, что для реализации ПСН с Т-образной обратной связью необходимо в качестве входного ОУ *DA1* использовать ОУ с низким напряжением смещения. Из проделанного обзора наиболее подходящим вариантом входного ОУ является ADA4530-1, который совмещает в себе низкий входной ток и низкое напряжение смещения. Во всех дальнейших экспериментах использовался данный ОУ.

На рисунке 3 приведено сравнение экспериментальной и теоретической зависимости выходного напряжения от значения образцового сопротивления *R1* Т-образной обратной связи, при R_{EQ} = const.



1 – теоретическая зависимость $U_{OUT(T)}$ с входным ОУ ADA4530-1; 2 – экспериментальная зависимость $U_{OUT(EXP)}$ с входным ОУ ADA4530-1; 3 – теоретическая зависимость, при идеальном ОУ $U_{OUT(ID)}$

Рисунок 3 – Зависимости выходного напряжения от значения образцового сопротивления *R1* Т-образной обратной связи (R_{EQ}=10 ГОм, R_{INS}=1 ТОм, U_{REF}=100 В)

Из анализа рисунка 3 следует, что экспериментальная зависимость $U_{OUT(EXP)}$ близка к теоретической $U_{OUT(T)}$. Имеется только небольшое отличие: у реального ОУ, используемого в экспериментах, напряжение смещения около 35 мкВ, тогда как у модели ОУ при симуляции использовалось максимально возможное напряжение смещения 40 мкВ.

Из приведенных экспериментальных данных следует вывод: применение Т-образной обратной связи позволяет уменьшить номинал образцового сопротивления, по крайней мере в 100 раз, что при полезном сигнале в 1 В дает погрешность в виде смещения сигнала, не более 0,4 %. При большем соотношении погрешность измерения увеличивается и выходной сигнал преобразователя начинает стремиться к напряжению питания ОУ.

Во второй части **второй главы** проведено исследование быстродействия ПСН с Т-образной обратной связью.

Для симуляции измеряемых величин емкости и сопротивления использовались справочные характеристики кабелей, которые выпускаются промышленностью в настоящее время. Максимальным сопротивлением изоляции R_{INS} (50 ГОм·км), в совокупности с достаточно большой электрической емкостью C_{INS} (100 нФ/км), обладают коаксиальные подводные кабели. Поэтому данные соотношения значений сопротивления изоляции и электрической емкости кабеля выбраны, как максимально возможные.

Вариацией значений R_{INS} и C_{INS} проводилось изменение параметров кабелей.

Во всех экспериментах сопротивление обратной связи подбиралось таким образом, чтобы выходное напряжение U_{OUT} на измеряемых пределах равнялось 1 В. Сопротивления Т-образной обратной связи были выбраны в соответствии с выводами (рекомендациями), полученными в первой части второй главы. Под длительностью переходного процесса принималось время T_S, по истечении которого отличие текущего значения переходного процесса от установившегося значения составляет 5%. Проведено исследование при измеряемом сопротивлении R_{INS} равном 10 ГОм, 100 ГОм и 1 ТОм.

Моделирование электрической схемы ПСН показало, что использование Т-образной обратной связи вместо классического варианта обратной связи позволяет увеличить быстродействие в (1,5…6) раз, в зависимости от предела измерения сопротивления и значения емкостей $C1$ и C_{INS}.

Для подтверждения полученных в результате моделирования данных по быстродействию ПСН с Т-образной обратной связью при контроле больших сопротивлений, имеющих емкостную составляющую, было проведено экспериментальное исследование.

Имитация изоляционного материала с заданными характеристиками проводилась параллельным подключением резистора типа КВМ с погрешностью не более 20% и конденсатора типа К71-7 с погрешностью не более 1%.

Значения сопротивлений и емкостей выбирались аналогично теоретическому исследованию. Принципиальная электрическая схема ПСН представлена на рисунке 2.

Во время проведения экспериментов по зависимости времени установления измеряемого сопротивления от емкости при $C1$=1 нФ и измеряемом сопротивлении 1 ТОм было замечено, что при C_{INS} более 3,3 нФ для ПСН с классической обратной связью и при C_{INS} более 4,7 нФ для ПСН с Т-образной обратной связью из-за недостаточной емкости в интеграторе преобразователя даже при монотонном установлении переходного процесса выходного напряжения, возникают самопроизвольные скачки сигнала, которые не затухают в дальнейшем и значительно увеличивают погрешность измерения (Рисунок 4). Данный эффект вызван недостаточной помехозащищенностью преобразователя и не проявлялся при моделировании с аналогичными характеристиками электронных компонентов.

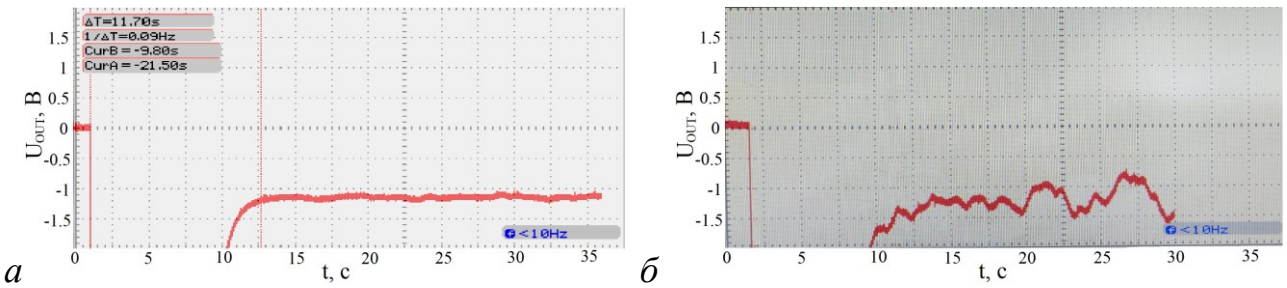
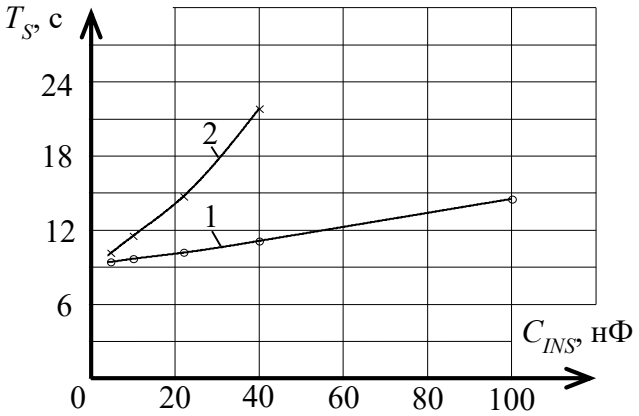


Рисунок 4 – Осциллограммы переходного процесса выходного напряжения ПСН (U_{REF}=100 В, R_{EQ}=10 ГОм, R_{INS}=1 ТОм, C_{INS}=10 нФ, $C1$=1 нФ): с Т-образной обратной связью ($R1$=100 МОм, $R2$=100 кОм, $R3$=1010 Ом) (*а*) и с классической обратной связью (*б*)

На меньших пределах измерения сопротивления (10 ГОм и 100 ГОм) преобразователь в данной конфигурации оказался неработоспособным. Для решения этой проблемы увеличивалась емкость $C1$.

На рисунке 5 представлена экспериментальная зависимость времени установления измеряемого сопротивления от емкости при $C1$=10 нФ и измеряемом сопротивлении 100 ГОм.



1 – ПСН с Т-образной обратной связью ($R1$=10 МОм, $R2$=100 кОм, $R3$=1010 Ом, R_{EQ}=10 ГОм); 2 – ПСН с классической обратной связью R_{EQ}=1 ГОм

Рисунок 5 – Экспериментальная зависимость времени установления при измерении сопротивления изоляции от емкости C_{INS} (U_{REF}=100 В, R_{INS}=100 ГОм, $C1$=10 нФ, U_{REF}=100 В)

При сравнении результатов моделирования с данными, полученными в результате экспериментов, сделаны следующие выводы:

– характер зависимостей времени установления измеряемого сопротивления от емкости в обоих случаях одинаковый, при аналогичных характеристиках электронных компонентов ПСН;

– более высокое быстродействие у ПСН с Т-образной обратной связью по сравнению с ПСН с классической обратной связью;

– экспериментально подтверждены результаты моделирования по быстродействию ПСН. Незначительные отличия экспериментальных

результатов от моделирования с использованием Altium Designer вызваны большим отклонением компонентов R_{INS} и C_{INS} от номинальных значений;

– не существует оптимального значения емкости интегратора *C1*, для всех рассматриваемых пределов измерения сопротивления изоляции кабельных изделий одновременно. Для обеспечения работоспособности преобразователя в совокупности с его максимальным быстродействием необходимо вместе с пределом измерения сопротивления изменять емкость интегратора *C1*:

1) при R_{EQ}=0,1 ГОм, *C1*=100 нФ;

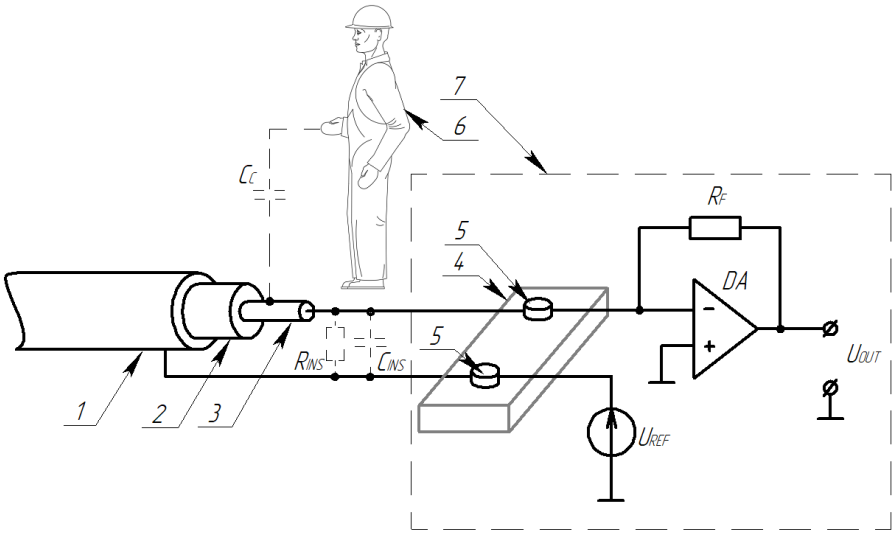
2) при R_{EQ}=1 ГОм, *C1*=10 нФ;

3) при R_{EQ}=10 ГОм, *C1*=1 нФ.

Экспериментально подтверждено, что ПСН с Т-образной обратной связью обладает до 3 раз лучшим быстродействием, чем ПСН с классической обратной связью.

В третьей главе рассмотрено влияние низкочастотных помех на ПСН при контроле изоляции кабеля, вызванных электростатическими зарядами, скапливающимися на поверхности предметов и людей, а также помех, вызванных воздействием постоянных и переменных магнитных полей.

На рисунке 6 представлена предлагаемая модель, которая описывает механизм воздействия, вызванный движением электростатических зарядов.



1 – экранирующая оболочка кабеля; 2 – изоляционный материал кабеля; 3 – токопроводящая жила кабеля; 4 – колодка для электродов; 5 – электроды для подключения контролируемого кабеля к ПСН; 6 – оператор, производящий контроль сопротивления изоляции кабеля; 7 – ПСН; C_C – емкость связи оператора и кабеля; R_{INS}, C_{INS} – сопротивление и емкость изоляции кабеля; U_{REF} – источник опорного напряжения; R_F – сопротивление отрицательной обратной связи; U_{OUT} – выходное напряжение ПСН; *DA* – операционный усилитель

Рисунок 6 – Эквивалентная схема влияния оператора при контроле сопротивления изоляции кабеля

Ток помехи, обусловленный емкостной связью оператора с ПСН и контролируемым кабелем равен:

$$I_n = C_C(t) \cdot \frac{\mathrm{d}U_n}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}q_C}{\mathrm{d}t}, \qquad (3)$$

где $C_C(t)$ – изменение емкости связи; dU_n – изменение амплитуды напряжения помехи; dt – изменение времени; dq_C – изменение заряда емкости связи.

Если электростатический заряд остается постоянным $dq_C = 0$ или оператор неподвижен, т.е. емкость связи постоянна $C_C(t) = 0$, то генерации тока помехи не происходит. Изменение величины заряда или емкости связи, т.е. взаимного расположения оператора и кабеля, приводит к тому, что на входе ОУ ПСН суммируется основной сигнал (ток $I_x=U_{REF}/R_{INS}$) и сигнал помехи (ток I_n).

Для проверки представленной выше модели влияния оператора при контроле сопротивления изоляции кабеля было проведено экспериментальное исследование.

В экспериментальной установке монтаж элементов ПСН и электродов колодки производился на листах из фторопласта-4. Данный материал выбран из-за большого удельного сопротивления (не менее $1{,}5\cdot10^{17}$ Ом·см), что позволило минимизировать токи утечки. В экспериментах сопротивление обратной связи подбиралось таким образом, чтобы выходное напряжение U_{OUT} на измеряемых пределах равнялось 1 В.

На рисунке 7 показан сигнал низкочастотной помехи на выходе ПСН, вызванный оператором, который «сел-встал» около контролируемого кабеля, на расстоянии 1 м.

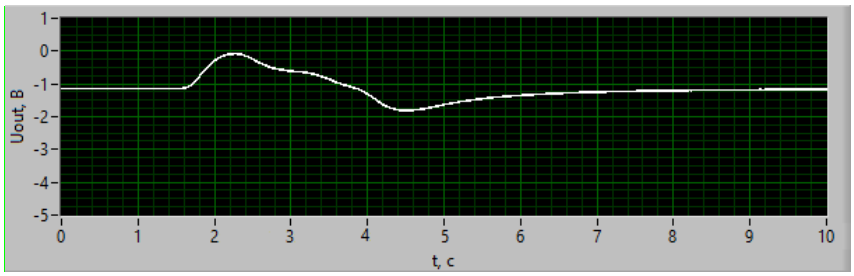


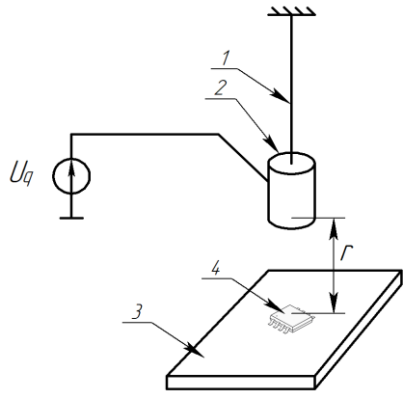
Рисунок 7 – Сигнал низкочастотной помехи на выходе ПСН (R_{INS}=1000 ГОм, $C1$=1 нФ, U_{REF}=100 В, $R1$=100 МОм, $R2$=100 кОм, $R3$=1010 Ом, R_{EQ}=10 ГОм), обусловленный движением оператора

Проанализировав сигнал помехи можно сделать вывод, что помеха имеет непериодическую форму с размахом около 2 В. При усреднении такого сигнала будет присутствовать постоянная составляющая от помехи, которая внесет погрешность в измерения.

Для получения повторяемости результатов эксперимента и объективной оценки влияния оператора, проводящего контроль сопротивления изоляции кабелей, на ПСН, необходимо имитировать искусственную низкочастотную помеху от источника с фиксированным значением напряжения.

На рисунке 8 показана схема экспериментальной установки. Искусственная низкочастотная помеха имитировалась за счет кратковременной (<1 с) подачи напряжения на электрод от источника постоянного напряжения. Кратковременное воздействие на электрод постоянным напряжением выбрано с целью создания непериодического сигнала помехи. За счет данного воздействия в полезный сигнал ПСН вносится постоянная составляющая,

которую невозможно отфильтровать из выходного сигнала ПСН методами усреднений.



1 – нить из изоляционного материала; 2 – металлический груз (электрод); 3 – печатная плата ПСН; 4 – входной операционный усилитель ПСН; U_q – источник напряжения постоянного тока; r – расстояние от основания электрода до инвертирующего входа ОУ ПСН

Рисунок 8 – Схема экспериментальной установки

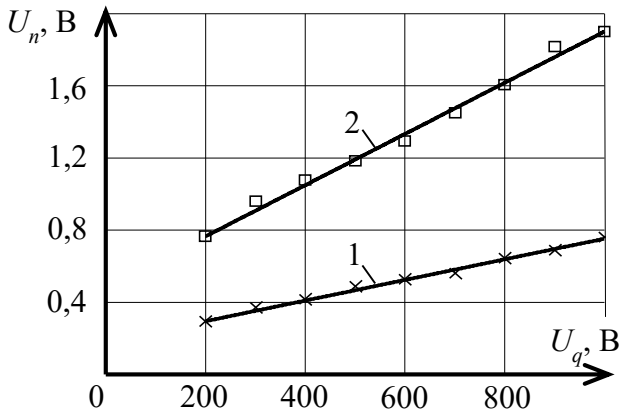
Во время эксперимента потенциал электрода задавался от 200 В до 1000 В с шагом 100 В. Расстояние *r* варьировалось изменением длины нити, изготовленной из изоляционного материала, что позволило минимизировать ток утечки электрода.

Электрод изготовлен из стали в форме цилиндра высотой *h*=38 мм и диаметром 14 мм. Электростатический заряд на цилиндре создавался путем подачи постоянного напряжения U_q.

Все исследования проводились в экранирующей камере, что позволило объективно оценить воздействие искусственно созданной помехи (низкочастотное электрическое поле), так как внутри экранирующей камеры воздействие внешних помех минимизировано.

В качестве ПСН использовалась схема с Т-образной обратной связью, обладающая более высокими метрологическими характеристиками, чем ПСН, представленный на рисунке 6. Характеристики преобразователя были следующими: опорное напряжение U_{REF}=100 В; эквивалентное сопротивление Т-образной обратной связи усилителя R_F=R_{EQ}=10 ГОм; емкость конденсатора в интеграторе *C1*=1 нФ.

При сравнении полученных экспериментальных зависимостей амплитуды напряжения помехи от потенциала заряженного электрода было выяснено, что электростатический заряд оказывают большее влияние при воздействии через кабель (Рисунок 9).



1 – воздействие заряженного электрода на ПСН; 2 – воздействие заряженного электрода на контролируемый кабель

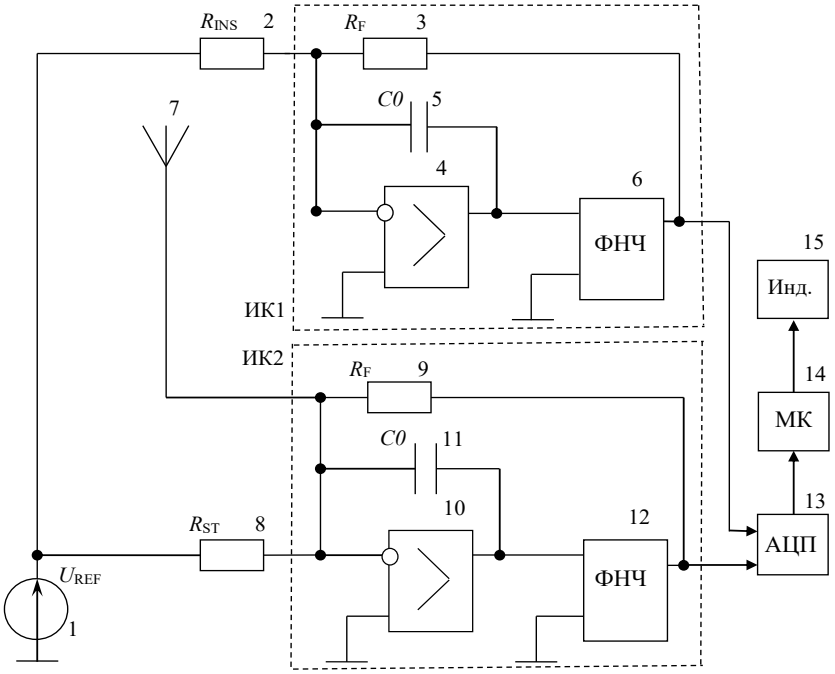
Рисунок 9 – Экспериментальная зависимость амплитуды напряжения помехи U_n от потенциала заряженного электрода при *r* = 40 мм

Также прослеживается линейная зависимость амплитуды напряжения помехи от величины заряда электрода. С увеличением расстояния *r* влияние искусственно созданной помехи уменьшается обратно пропорционально.

Влияние магнитного поля неподвижного и движущегося постоянного магнита на процесс измерения сопротивления изоляционных материалов незначительно. Также незначительно воздействие на процесс измерения низкочастотного электромагнитного поля с магнитным потоком, который на порядок превышает магнитный поток электромагнитного поля в лаборатории, в которой проводились эксперименты.

В четвертой главе описана разработка дифференциального метода с использованием двух измерительных каналов и алгоритмов без применения фильтров, подавляющих низкочастотную составляющую. Метод позволяет в режиме реального времени производить компенсацию помехи.

В качестве схемы измерения использовался ПСН с интегратором в первом каскаде и Т-образной обратной связью (Рисунок 2). Для выделения сигнала низкочастотной помехи использовался второй измерительный канал, который улавливает сигнал низкочастотной помехи посредством антенны. Структурная схема устройства представлена на рисунке 10. Данное техническое решение защищено патентом.



ИК1 – первый измерительный канал; ИК2 – второй измерительный канал; 1 – источник опорного напряжения (ИОН); 2 – сопротивление изоляции кабеля; 3, 9 – образцовое сопротивление обратной связи; 4, 10 – ОУ; 5, 11 – конденсатор; 6, 12 – фильтр низких частот (ФНЧ); 7 – антенна; 8 – эталонный резистор; 13 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП); 14 – микроконтроллер; 15 – индикатор

Рисунок 10 – Схема ПСН с интегратором в первом каскаде и Т-образной обратной связью с двумя измерительными каналами

Источник опорного напряжения U_{REF} и измеряемое сопротивление изоляции кабеля R_{INS} образуют генератор тока. Нагрузкой генератора тока

служит образцовый резистор R_F в отрицательной обратной связи, падение напряжения на котором в установившемся режиме равно:

$$U_{INS} = -\frac{R_F}{R_{INS}} \cdot U_{REF}, \qquad (4)$$

где U_{INS} – падение напряжения на образцовом сопротивлении R_F в ИК1.

Выходной сигнал первого измерительного канала имеет следующий вид:

$$U_{CH1} = U_{INS} + U_{IF1} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_{IF} \cdot t + \varphi_{IF1}) + U_{LF1} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_{LF} \cdot t + \varphi_{LF1}), \qquad (5)$$

где U_{IF1} – амплитуда напряжения помехи промышленной частоты; t – время; f_{IF} – частота напряжения помехи промышленной частоты; φ_{IF1} – начальная фаза напряжения помехи промышленной частоты; U_{LF1} – амплитуда напряжения низкочастотной помехи; f_{LF} – частота напряжения низкочастотной помехи; φ_{LF1} – начальная фаза напряжения низкочастотной помехи.

В математической модели подразумевается, что низкочастотная помеха имеет периодический характер с частотой f_{LF} десятые доли – единицы Гц.

Антенна представляет собой изолированный проводник длиной (1,5…2) м. Во время измерения антенна должна находиться на контролируемом кабеле и повторять форму бухты кабеля.

Сигнал с антенны поступает на вход ОУ *DA2* и содержит информацию о помехе. Значение эталонного сопротивлении R_{ST} известно заранее.

Выходной сигнал второго измерительного канала имеет следующий вид:

$$U_{CH2} = U_{ST} + U_{IF2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_{IF} \cdot t + \varphi_{IF2}) + U_{LF2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_{LF} \cdot t + \varphi_{LF2}), \qquad (6)$$

где U_{ST} – падение напряжения на образцовом сопротивлении R_F в ИК2; U_{IF2} – амплитуда напряжения помехи промышленной частоты, улавливаемая антенной; φ_{IF2} – начальная фаза напряжения помехи промышленной частоты, улавливаемая антенной; U_{LF2} – амплитуда напряжения низкочастотной помехи, улавливаемая антенной; φ_{LF2} – начальная фаза напряжения низкочастотной помехи, улавливаемая антенной.

Напряжения помех на выходах первого и второго измерительных каналов имеют одинаковую частоту, но различную амплитуду и фазу.

Для получения информации только об измеряемом сопротивлении изоляции необходим алгоритм адаптивной обработки сигналов, который в режиме реального времени подбирает коэффициенты k_1, k_2 и фазовые сдвиги $\Delta\varphi_{IF}$, $\Delta\varphi_{LF}$ выходного сигнала второго измерительного канала относительного выходного сигнала первого измерительного канала:

$k_1 = U_{IF1}/U_{IF2}$ – коэффициент, определяющий отношение амплитуды напряжения помехи промышленной частоты первого измерительного канала к амплитуде напряжения помехи промышленной частоты второго измерительного канала;

$k_2 = U_{LF1}/U_{LF2}$ – коэффициент, определяющий отношение амплитуды напряжения низкочастотной помехи первого измерительного канала к амплитуде напряжения низкочастотной помехи второго измерительного канала;

$\Delta\varphi_{IF} = \varphi_{IF1} - \varphi_{IF2}$ – фазовый сдвиг напряжения помехи промышленной частоты между первым и вторым измерительными каналами;

$\Delta\varphi_{LF} = \varphi_{LF1} - \varphi_{LF2}$ – фазовый сдвиг напряжения низкочастотной помехи между первым и вторым измерительными каналами.

В результате становится возможной компенсация низкочастотной помехи и помехи промышленной частоты:

$$\begin{aligned} U_{INS} = U_{CH1} - [U_{ST} + k_1 \cdot U_{IF2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_{IF} \cdot t + \varphi_{IF1} - \Delta\varphi_{IF}) + \\ + k_2 \cdot U_{LF2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_{LF} \cdot t + \varphi_{LF1} - \Delta\varphi_{LF})] \end{aligned}, \quad (7)$$

На разных пределах измерения сопротивления изоляции коэффициенты k_1, k_2 и фазовые сдвиги $\Delta\varphi_{IF}$, $\Delta\varphi_{LF}$ не являются постоянными. Кроме того, они могут изменяться в зависимости от уровня сигналов, поэтому найти схемотехническое решение (на основе аналоговых электронных схем или цифровых схем с жесткой логикой) для подбора коэффициентов k_1, k_2 и фазовых сдвигов $\Delta\varphi_{IF}$, $\Delta\varphi_{LF}$ в реальном режиме времени является достаточно сложной задачей. Цифровая обработка сигналов с помощью микропроцессоров, в которых алгоритмы могут быть быстро изменены путем перепрограммирования, обеспечивает более гибкий подход к решению данной задачи.

Для исследования помехоустойчивости двухканального ПСН при контроле сопротивления изоляции кабелей использовалась установка представленная и описанная в Главе 3 (Рисунок 8).

Во время эксперимента основание электрода находилось на расстоянии 40 мм от контролируемого сопротивления, что соизмеримо с размером самого электрода.

Схемотехника двухканального ПСН позволила одновременно исследовать одноканальную и двухканальную схемы.

Оценка помехоустойчивости одноканальной схемы ПСН проводилась по выходному напряжению первого измерительного канала U_{CH1}. Данный сигнал средствами цифровой обработки фильтровался от помехи промышленной частоты линейным фильтром Баттерворта второго порядка с частотой среза 30 Гц и в дальнейшем – усреднялся.

Цифровая обработка сигналов двухканальной схемы ПСН была реализована по двум алгоритмам: алгоритму с использованием минимальных и максимальных отклонений, представленному на рисунке 11 и алгоритму с использованием линейной аппроксимации, представленному на рисунке 12. Фильтрация помехи промышленной частоты производилась аналогично одноканальной схеме ПСН. Преобразователи сопротивления были реализованы по Т-образной схеме, приведенной на рисунке 2, в соответствии с выводами и рекомендациями, полученными в Главе 2.

Данные схемы алгоритмов показывают пути прохождения и преобразования сигналов структурными блоками на языке близком к языку графического программирования LabView, т.е. стрелками показаны сигналы, а прямоугольниками – блоки преобразования.

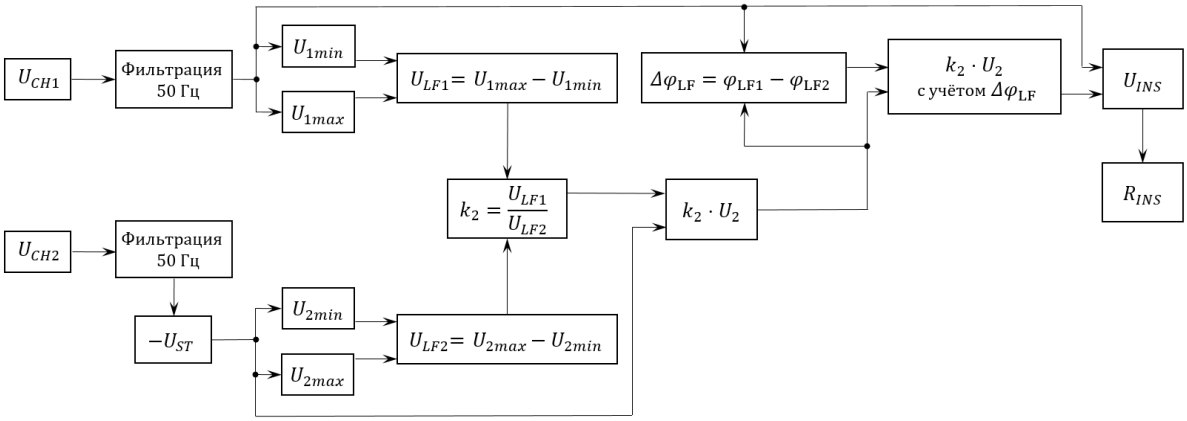


Рисунок 11 – Алгоритм адаптивной обработки сигнала с использованием минимальных и максимальных значений сигналов U_{CH1}, U_{CH2} для определения коэффициента k_2

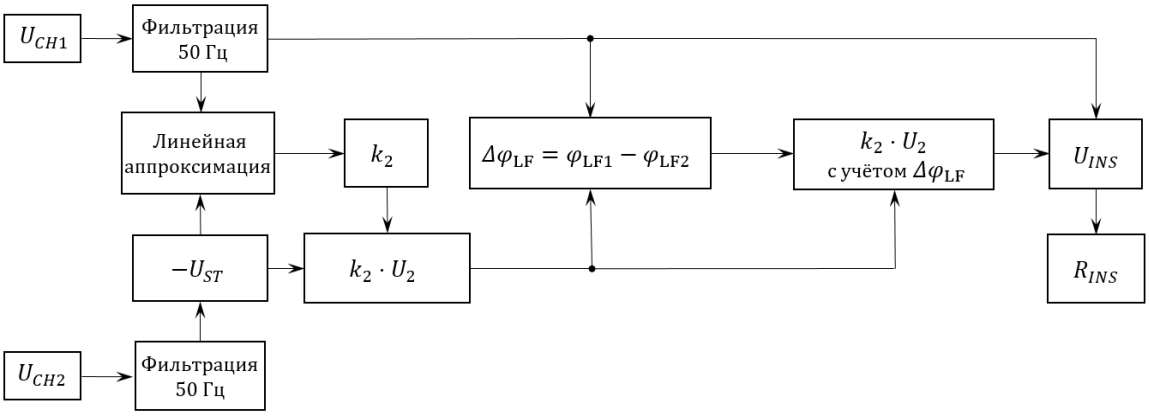


Рисунок 12 – Алгоритм адаптивной обработки сигнала с использованием линейной аппроксимации для определения коэффициента k_2

Для определения эффективности предложенной двухканальной схемы ПСН по сравнению с одноканальной, было проведено экспериментальное исследование помехоустойчивости преобразователей от воздействия искусственно созданной низкочастотной помехи. В исследованиях интервал обработки сигнала T_{PR} выбирался из диапазона (1…2,5) с.

Из полученных результатов следует вывод, что при увеличении времени обработки сигнала погрешность уменьшается.

Для всех исследуемых пределов измерения, наименьшая погрешность преобразователя от воздействия низкочастотной помехи была получена у двухканального ПСН с применением алгоритма минимальных и максимальных отклонений, при T_{PR}=2,5 с. Использование антенны у двухканального преобразователя позволяет уменьшить погрешность в (1,45…3,7) раза.

Итоговое преимущество в помехоустойчивости двухканального ПСН перед одноканальным оказалось:

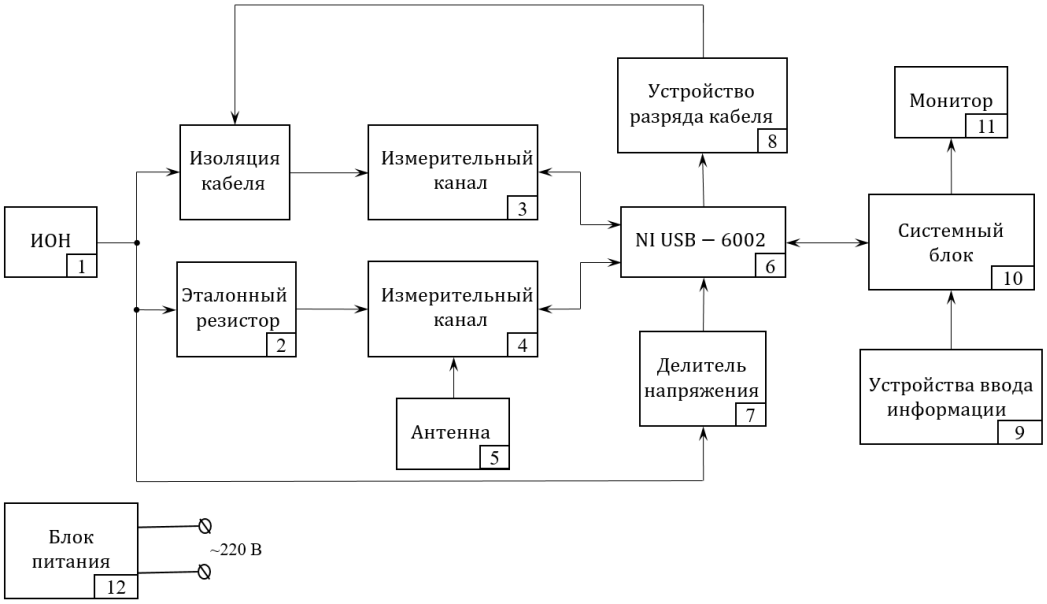
– при R_{INS}=10 ГОм в 1,45 раза (погрешность 0,9% против 1,3%);

– при R_{INS}=100 ГОм в 3,7 раза (погрешность 3% против 11%);

– при R_{INS}=1000 ГОм в 2,2 раза (погрешность 14% против 31%).

В пятой главе рассматривается макет тераомметра Т-01 (далее тераомметр Т-01), его рабочие условия применения, технические характеристики и устройство.

Структурная схема тераомметра Т-01 приведена рисунке 13. Прибор состоит из источника опорного напряжения (ИОН) 1, эталонного резистора 2, двух измерительных каналов 3 и 4, антенны 5, многофункционального устройства сбора данных NI USB-6002 6, делителя напряжения 7, устройства разряда кабеля 8, устройств ввода информации 9, системного блока 10, монитора 11 и блока питания 12.



1 – ИОН; 2 – эталонный резистор R_{ST}; 3 – первый ИК; 4 – второй ИК; 5 – антенна; 6 – устройство сбора данных NI USB-6002; 7 – делитель напряжения; 8 – устройство разряда кабеля; 9 – устройства ввода информации; 10 – системный блок; 11 – монитор; 12 – блок питания

Рисунок 13 – Структурная схема тераомметра Т-01

Блок питания и аналоговая часть тераомметра Т-01 расположены в основном корпусе устройства.

Процедура «рабочей» настройки прибора позволяет провести корректировку погрешности. Для этого используются высокоточные резисторы известного номинала в диапазоне ($10^6 \ldots 10^{12}$) Ом.

В тераомметре Т-01 предусмотрено два режима измерения:

– с ручным выбором пределов измерения;

– с автоматическим выбором пределов измерения.

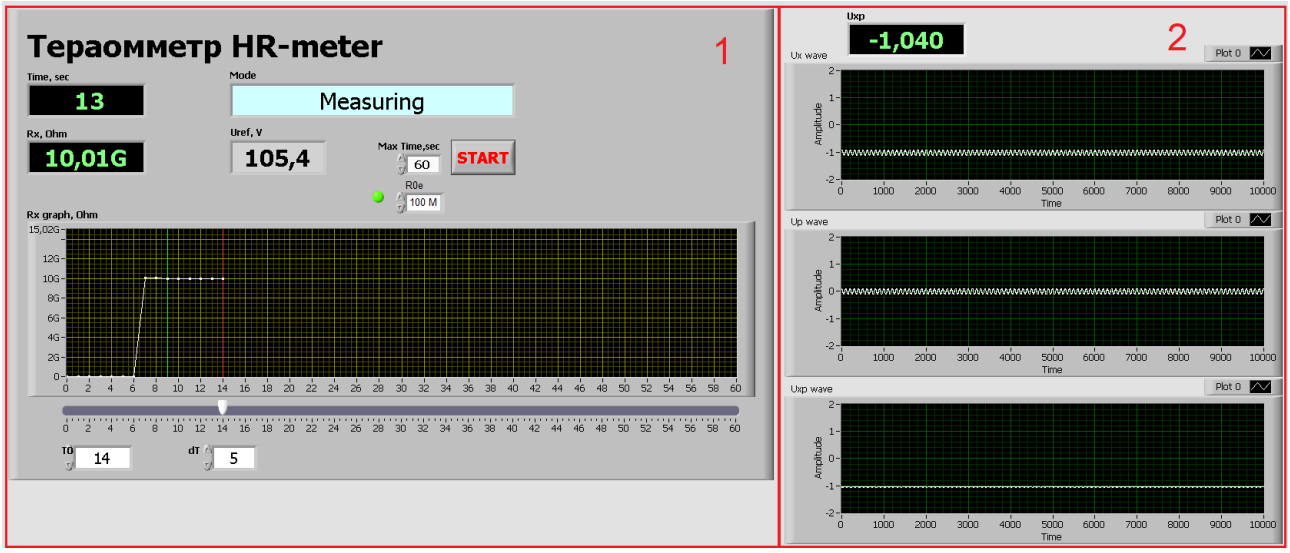
Лицевая панель программы измерения тераомметра Т-01 показана на рисунке 14.

Лицевую панель программы измерения тераомметра визуально можно разделить на две части.

Правая часть панели является вспомогательной и позволяет:

– в режиме реального времени наблюдать за сигналами выходных напряжений измерительных каналов тераомметра;

– контролировать текущее значение выходного напряжения тераомметра.



1 – левая часть панели; 2 – правая часть панели

Рисунок 14 – Лицевая панель программы измерения тераомметра Т-01

Левая часть панели является основной и позволяет:

– выбрать сопротивление обратной связи тераомметра «R0e», что устанавливает предел измерения;

– задать временной диапазон измерения (60…600) с с шагом в 1 с;

– контролировать режим работы прибора, текущее значение измеряемого сопротивления, текущее значение измерительного напряжения, значение времени после начала измерения, значение выбранного предела;

– анализировать графическое представление измеренных данных сопротивления от времени *R(t)*.

В результате испытаний прибора комиссией с участием специалистов ООО «НПО Редвилл», г. Томск, были определены следующие технические характеристики тераомметра Т-01:

– диапазон измеряемых значений сопротивления (10^5…10^{13}) Ом;

– измерительное напряжение постоянного тока 100 В ± 10 %;

– относительная погрешность на пределе измерения 10 ТОм не более 10 %;

– время установления показаний сопротивления изоляции кабеля (R_{INS}=1 ТОм, C_{INS}=4,7 нФ) с автоматическим выбором пределов не более 60 с.

По сравнению с промышленными тераомметрами, которые применяются для контроля сопротивления изоляции кабельных изделий, прибор Т-01 обеспечивает наибольший верхний предел измерения сопротивления при ограниченном значении опорного напряжения (100 В). При этом погрешность тераомметра Т-01 как минимум не хуже, чем у промышленных приборов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Экспериментально и теоретически были определены оптимальные соотношения сопротивлений Т-образной обратной связи, что позволяет уменьшить номинал образцового сопротивления минимум в 100 раз.

2. Экспериментально подтверждено, что ПСН с Т-образной обратной связью обладает до 3 раз лучшим быстродействием, чем ПСН с классической обратной связью. На всех рассматриваемых пределах измерения сопротивления (R_{INS}=10 ГОм, R_{INS}=100 ГОм и R_{INS}=1000 ГОм) время установления выходного напряжения ПСН не превышает 15 с.

3. На основе исследования влияния низкочастотных помех на показания средств контроля сопротивления изоляции кабельных изделий установлено, что основным источником низкочастотных помех является электростатический заряд, накапливаемый на поверхности ПСН, объекте контроля и на операторе, проводящем контроль.

4. Предложен и реализован метод компенсации низкочастотных помех при контроле сопротивления изоляции кабельных изделий на основе двухканальной схемы ПСН с Т-образной обратной связью. Данное техническое решение защищено патентом.

5. Экспериментально установлено, что двухканальный ПСН с предложенными адаптивными алгоритмами для фильтрации низкочастотных помех обладает в до 3,7 раз лучшей помехозащищенностью, чем одноканальный ПСН с усредняющим фильтром.

6. Разработан, изготовлен и испытан макет тераомметра Т-01 обеспечивающий технические характеристики (опорное напряжение, верхний предел измерения, погрешность и быстродействие), которые удовлетворяют требованиям ГОСТ 3345-76 на пределах измерения (10^5…10^{13}) Ом.

ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Издания, индексируемые базами данных Scopus и Web of Science:

1. **Yermoshin, N.I.** Increase in Fast Response Time of the Resistance-to-Voltage Converter When Monitoring the Cable Products' Insulation Resistance / N.I. Yermoshin, E.V. Yakimov, A.E. Goldshtein, D.A. Sednev // Sensors. – 2021. – Vol. 21 (2). – Article number: 368.

2. **Yermoshin, N.I.** Double-channel resistance-to-voltage converter for cable teraohmmeters / N.I. Yermoshin, E.V. Yakimov, A.E. Goldshtein // Bulletin of the Karaganda University. «Physics» series. – 2020. – Vol. 97(1). – P. 105-114.

3. **Yermoshin, N.I.** Study of the effect of low-frequency interference on resistance-to-voltage converter in cable insulation testing / N.I. Yermoshin, E.V. Yakimov, A.E. Goldshtein // Materials Science Forum: Modern Problems in Materials Processing, Manufacturing, Testing and Quality Assurance II – 2019. – Vol. 970. – p. 297-304.

4. **Yermoshin, N.I.** Feasibility of using T-shaped feedback in teraohmmeters/ N.I. Yermoshin, E.V. Yakimov// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: Modern Technologies for Non-Destructive Testing. – 2018. – Vol.289. p. 1-6.

5. Starikova, N. S. Effect of Temperature in Electrocapacity In-Process Control of Cable Products / N. S. Starikova, V. V. Redko, L. A. Redko, **N. I. Ermoshin** // MATEC Web of Conferences. – 2016. – Vol. 79. – p. 1-6.

Материалы конференции:

6. **Ермошин Н.И.** Увеличение быстродействия преобразователя сопротивления в напряжение при контроле сопротивления изоляции кабельных изделий / Н.И. Ермошин, Е.В. Якимов // Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее: сборник научных трудов VII Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых, 11 – 13 ноября 2020 г., г. Томск. — Томск: Изд-во ТПУ, 2020. — С. 23.

7. **Ермошин Н.И.** Исследование влияния низкочастотных помех на преобразователь сопротивления в напряжение при контроле изоляции кабеля / Н.И. Ермошин, Е.В. Якимов; науч. рук. А.Е. Гольдштейн // Инновации в неразрушающем контроле (SibTest 2019): сборник тезисов докладов V международной конференции, Екатеринбург, 26–28 июня 2019 г. — Томск: Изд-во ТПУ, 2019. – С. 27-28.

8. **Ермошин Н.И.** Влияние низкочастотных помех на преобразователь сопротивления при контроле изоляции кабеля / Н.И. Ермошин, Е.В. Якимов // Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее: сборник научных трудов VII Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых, 8 -13 октября 2018 г., г. Томск. — Томск: Изд-во ТПУ, 2018. – С. 34.

9. **Ермошин Н.И.** Особенности применения Т-образной обратной связи в тераомметрах / Н.И. Ермошин, Е.В. Якимов // Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее: сборник научных трудов VI Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых, 9 -14 октября 2017 г., г. Томск. – Томск: Изд-во ТПУ, 2017. – С. 78.

10. **Ермошин Н.И.** Особенности применения Т-образной обратной связи в тераомметрах / Н.И. Ермошин, Е.В. Якимов; науч. рук. А.Е. Гольдштейн // Инновации в неразрушающем контроле (SibTest 2017): сборник тезисов IV международной конференции, Новосибирск, 27-30 июня 2017 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2017. – С. 79-81.

11. **Ермошин Н.И.** Влияние электрической емкости кабеля при измерении сопротивления изоляции [Электронный ресурс] / Н.И. Ермошин, Е.В. Якимов // Информационно-измерительная техника и технологии: материалы VII научно-практической конференции с международным участием, г. Томск, 25-28 мая 2016 г. / Национальный исследовательский Томский государственный университет; под ред. А.В. Юрченко – Томск: Изд-во Томского государственного университета, 2016. – С. 280-290

Патент на изобретение:

12. Пат. 2698505 C1 Российская Федерация, МПК G01R 27/02. Устройство для измерения сопротивления изоляции / **Ермошин Н.И.**, Якимов Е.В., Гольдштейн А.Е.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет». – №2019109919; заявл. 04.04.2019; опубл. 28.08.2019, Бюл. №25 – 12 с.:ил.