

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
д.т.н., профессор
Гольдштейн Александр Ефремович

Томск – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЕЙ.....	12
1.1 Общая характеристика кабельных изделий.....	12
1.2 Классификация методов измерения сопротивления изоляции кабельных изделий.....	17
1.2.1 Методы непосредственной оценки	17
1.2.1.1 Метод стабилизированного тока в цепи делителя.....	17
1.2.1.2 Метод преобразования сопротивления в напряжение	19
1.2.2 Мостовой метод	20
1.2.3 Метод вольтметра-амперметра.....	22
1.2.4 Метод заряда-разряда конденсатора	24
1.2.5 Метод преобразования сопротивления в напряжение с интегрированием.....	27
1.3 Выводы по Главе 1	28
ГЛАВА 2. УВЕЛИЧЕНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ И ТОЧНОСТИ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ.....	29
2.1 Особенности применения Т-образной обратной связи	29
2.1. Быстродействие ПСН с Т-образной обратной связью.....	37
2.2.1 Теоретическое исследование быстродействия ПСН с Т-образной обратной связью .	39
2.2.2 Экспериментальное исследование быстродействия ПСН с Т-образной обратной связью.....	48
2.3 Выводы по Главе 2	55
ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ПОМЕХ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ.....	57
3.1 Исследование влияния электростатического заряда на ПСН.....	58
3.2 Исследование влияния электростатического заряда на ПСН с подключенным к нему кабелем	63
3.3 Исследование влияния магнитного поля на ПСН с подключенным к нему кабелем	66
3.4 Выводы по Главе 3	67
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ В НАПРЯЖЕНИЕ ПРИ КОНТРОЛЕ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ	69
4.1 Дифференциальный метод с использованием двух измерительных каналов.....	69
4.2 Разработка алгоритмов адаптивной обработки сигналов	72
4.2.1 Алгоритм с использованием минимальных и максимальных отклонений	73
4.2.2 Алгоритм с использованием линейной аппроксимации	74
4.2.3 Классификация возможных алгоритмов адаптивной обработки сигналов для двухканальной схемы ПСН.....	75

4.3 Установка для исследования помехоустойчивости одноканальной и двухканальной схем ПСН	76
4.4 Экспериментальное исследование помехоустойчивости одноканальной и двухканальной схем ПСН	78
4.5 Выводы по Главе 4	86
ГЛАВА 5. МАКЕТ ТЕРАОММЕТРА Т-01 И ЕГО МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ	87
5.1 Назначение	87
5.2 Технические характеристики	87
5.3 Устройство прибора	89
5.4 «Рабочая» настройка прибора	91
5.5 Режимы измерения	94
5.5.1 Ручной выбор пределов измерения	94
5.5.2 Автоматический выбор пределов измерения	97
5.6 Выводы по главе 5	98
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	99
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	100
ПРИЛОЖЕНИЕ А. АКТ ВНЕДРЕНИЯ РАЗРАБОТКИ В УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС ТПУ..	108
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. АКТ ИСПЫТАНИЙ МАКЕТА ТЕРАОММЕТРА Т-01	109
ПРИЛОЖЕНИЕ В. АКТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ	110

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. 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 [1]. 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 [2, 3]. 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 [4].

В настоящее время на рынке имеются тераомметры с верхним пределом измерения сопротивления до 10^6 ТОм [5-7]. 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 [6].

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) [8].

Существенных результатов в вопросе повышения быстродействия средств контроля сопротивления, при работе с объектами, имеющими большую емкость, добился Е.В. Якимов [9]. 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 [8-12].

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 [9, 13]. Однако, эти работы не могут быть применены в чистом виде, когда объектом контроля является изоляция кабельных изделий, потому что кабель является хорошей антенной и улавливает всевозможные помехи, которые вносят значительную погрешность в 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.

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. Выбран наиболее перспективный метод, при усовершенствовании которого будет разрабатываться средство контроля сопротивления, удовлетворяющее по характеристикам требованиям ГОСТ 3345-76 и обладающее приемлемой помехозащищенностью.

Во второй главе рассмотрены особенности применения Т-образной обратной связи в тераомметрах и ее влияние на быстродействие при контроле сопротивления изоляции кабелей.

Приведен обзор операционных усилителей, 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. В результате уменьшается погрешность разрабатываемого средства контроля. Определено, что использование Т-образной обратной связи в схеме ПСН тераомметра позволяет уменьшить номинал образцового сопротивления более чем в 100 раз.

В работе приведены теоретические и экспериментальные результаты подтверждающие, 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.

Выяснено, что при динамическом воздействии электростатических зарядов на выходе ПСН помимо полезного сигнала появляется низкочастотный сигнал помехи.

В работе экспериментально определено, что амплитуда напряжения помехи увеличивается линейно при увеличении потенциала электростатического заряда. Также увеличение амплитуды напряжения помехи происходит при уменьшении расстояния между заряженным электродом и преобразователем сопротивления или объектом контроля.

Влияние магнитного поля неподвижного и движущегося постоянного магнита на процесс контроля сопротивления изоляционных материалов незначительно. Также незначительно воздействие на процесс контроля низкочастотного электромагнитного поля с магнитным потоком, который на

порядок превышает магнитный поток электромагнитного поля в лаборатории, в которой проводились эксперименты.

В четвертой главе рассмотрена разработка дифференциального метода с использованием двух измерительных каналов и алгоритма, 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. Это позволило обеспечить в разрабатываемом средстве контроля технические характеристики в соответствии с требованиями ГОСТ 3345-76. Для выделения сигнала низкочастотной помехи использовался второй измерительный канал.

Пятая глава посвящена описанию технических характеристик, устройства и комплектации тераомметра Т-01, который предназначен для контроля сопротивлений изоляции кабелей в соответствии с требованиями ГОСТ 3345-76.

Для проведения «рабочей» настройки тераомметра Т-01 используются высокоточные резисторы. «Рабочая» настройка позволяет провести корректировку тераомметра Т-01 с целью исключения мультипликативной и аддитивной составляющих погрешностей измерения сопротивления изоляции.

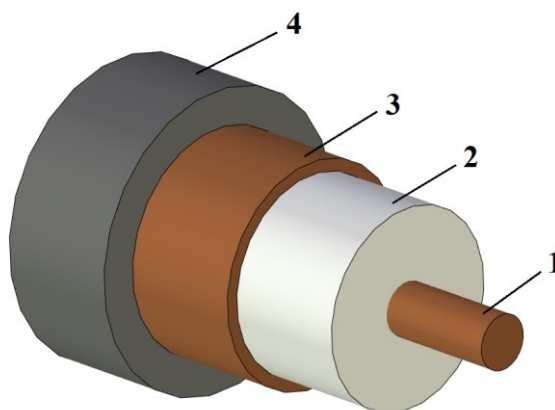
Для прибора реализованы программы с ручным и автоматическим выбором пределов измерения сопротивления. Программа с автоматическим выбором пределов измерения обладает таким же интерфейсом и функционалом, что и программа с ручным выбором пределов.

ГЛАВА 1. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЕЙ

1.1 Общая характеристика кабельных изделий

Все типы электрических кабелей состоят по существу из токопроводящей жилы с низким сопротивлением для направления потока электромагнитной энергии или информации и изоляции для создания электрически прочного диэлектрического промежутка между токопроводящими жилами и между жилами и заземленными элементами. В некоторых типах кабелей, таких как одножильные кабели, два компонента образуют готовый кабель, но, как правило, с увеличением напряжения конструкция становится намного сложнее. Кабели могут включать в себя: экран для создания в изоляции радиального электрического поля или защиты передаваемых информационных сигналов от электромагнитных помех; влагозащитную оболочку; броню для механической защиты; защиту от коррозии металлических компонентов; различные дополнения, например, трубки для отвода тепла, выделяемого в кабеле [1, 14, 15].

Общее устройство коаксиального кабеля показано на рисунке 1.1 [16].



1 – токопроводящая жила; 2 – изоляция; 3 – экран; 4 – оболочка

Рисунок 1.1 – Устройство коаксиального кабеля

Для токопроводящих жил используется медная, алюминиевая, стальная, нихромовая проволока. Нихромовая проволока используется только в нагревательных проводах и кабелях. Расчетное значение сопротивления токопроводящей жилы можно получить по следующему выражению [17]:

$$R_c = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (1.1)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление жилы, Ом·м; l – длина кабельного изделия, м; S – площадь поперечного сечения жилы, м².

Диаметры кабельной проволоки могут быть от нескольких микрометров до 20 мм [1, 18]. Номинальные значения электрического сопротивления токопроводящих жил для различных кабелей и проводов приведены в [18]. Электрическое сопротивление 1 км жилы при температуре 20 °С находится в диапазоне от 0,1 до 1000 Ом, в зависимости от материала и сечения проволоки. Корректировка, которую надо выполнить для приведения значения электрического сопротивления к 20 °С и длине 1 км, может быть проведена с использованием следующей формулы [18]:

$$R_{20} = R_t \cdot k_t \frac{1000}{l} \quad (1.2)$$

где R_t – измеренное электрическое сопротивление жилы, Ом; k_t – поправочный температурный коэффициент.

В настоящее время имеется большое разнообразие изоляций кабельных изделий, которые изготавливаются из следующих материалов [19, 20]:

- пропитанная бумага;
- резина;
- поливинилхлорид (ПВХ);
- полиэтилен (ПЭ);
- сшитый полиэтилен (СПЭ);
- фторопласт;
- полистирол;
- кремнийорганические каучуки;

– другие.

Сопротивление изоляции кабеля на постоянном токе представляет собой частное от деления напряжения на ток, проходящий сквозь изоляцию через минуту после включения напряжения [16].

Расчетное сопротивление изоляции одножильного кабеля имеет следующий вид [16]:

$$R_{INS} = \frac{\rho_{INS}}{2 \cdot \pi} \ln \frac{R}{r} \cdot 10^{-8}, \text{ МОм} \cdot \text{м} \quad (1.3)$$

где ρ_{INS} – удельное объемное сопротивление изоляции, Ом·м; R – внешний радиус изоляции, м; r – внутренний радиус изоляции, м.

Формулы для расчета значений сопротивлений изоляции многожильных кабелей будут значительно сложнее чем выражение (1.3) [16]. Также стоит отметить, что расчетные значения не учитывают влияния диэлектрических потерь, которые связаны с рассеиванием энергии в изоляции кабеля при воздействии на него электрического поля.

Помимо всего перечисленного полная схема замещения кабеля включает в себя индуктивность L_C и емкость изоляции C_{INS} . На рисунке 1.2 показана эквивалентная схема замещения двухжильного кабеля [21].

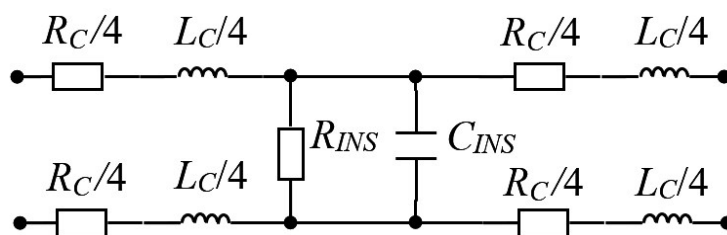


Рисунок 1.2 – Эквивалентная схема замещения реального двухжильного кабеля

Активное сопротивление и индуктивность кабеля влияют на процесс измерения, как правило, только на высоких частотах. Измерение же сопротивления изоляции кабеля проводится на постоянном токе, либо на низких частотах. Благодаря этому активным сопротивлением и индуктивностью при контроле сопротивления изоляции кабеля можно пренебречь [9]. Например, для коаксиального кабеля RG6U [22] приводятся следующие параметры:

$R_C=23,26$ Ом/км, $R_{INS}=1$ ГОм·км, $C_{INS}=56,8$ нФ/км. Значение индуктивности в литературе на кабели не приводится, но существует формула для ее расчета [14]:

$$L_C = K + 0,2 \cdot \ln \frac{2 \cdot S}{d}, \text{ мГн/км} \quad (1.4)$$

где K – константа, для кабеля RG6U равняется 0,05; S – расстояние между проводниками, мм (для кабеля RG6U равняется 6,8 мм); d – диаметр токопроводящей жилы, для кабеля RG6U равняется 1,02 мм.

Из формулы (1.4) следует, что индуктивность кабеля RG6U равняется 0,35 мГн/км. На частоте 50 Гц при длине данного кабеля 1000 м полное сопротивление индуктивности равно 0,11 Ом, полное сопротивление емкости изоляции – 56,1 кОм, активное сопротивление жил – 23,26 Ом, активное сопротивление изоляции – 1 ГОм. Таким образом, видно, что на низкой частоте реактивное сопротивление индуктивности, емкости и активное сопротивление жил значительно меньше активного сопротивления изоляции.

На рисунке 1.3 показана упрощенная схема замещения реального кабеля на низкой частоте с параллельно включенными идеальной емкостью и активным сопротивлением R_{INS} .

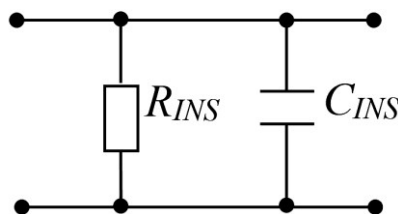


Рисунок 1.3 – Упрощенная схема замещения реального двухжильного кабеля на низкой частоте

Ток, протекающий через изоляцию кабеля, состоит из трех компонентов [23-25]:

- ток заряда емкости изоляции;
- ток утечки (проводимости);
- ток абсорбции.

Как показано на рисунке 1.4, полный ток представляет собой сумму трех составляющих, и именно этот ток можно измерить непосредственно с помощью

амперметра, либо тераомметра, в случае если измеряется сопротивление изоляции.

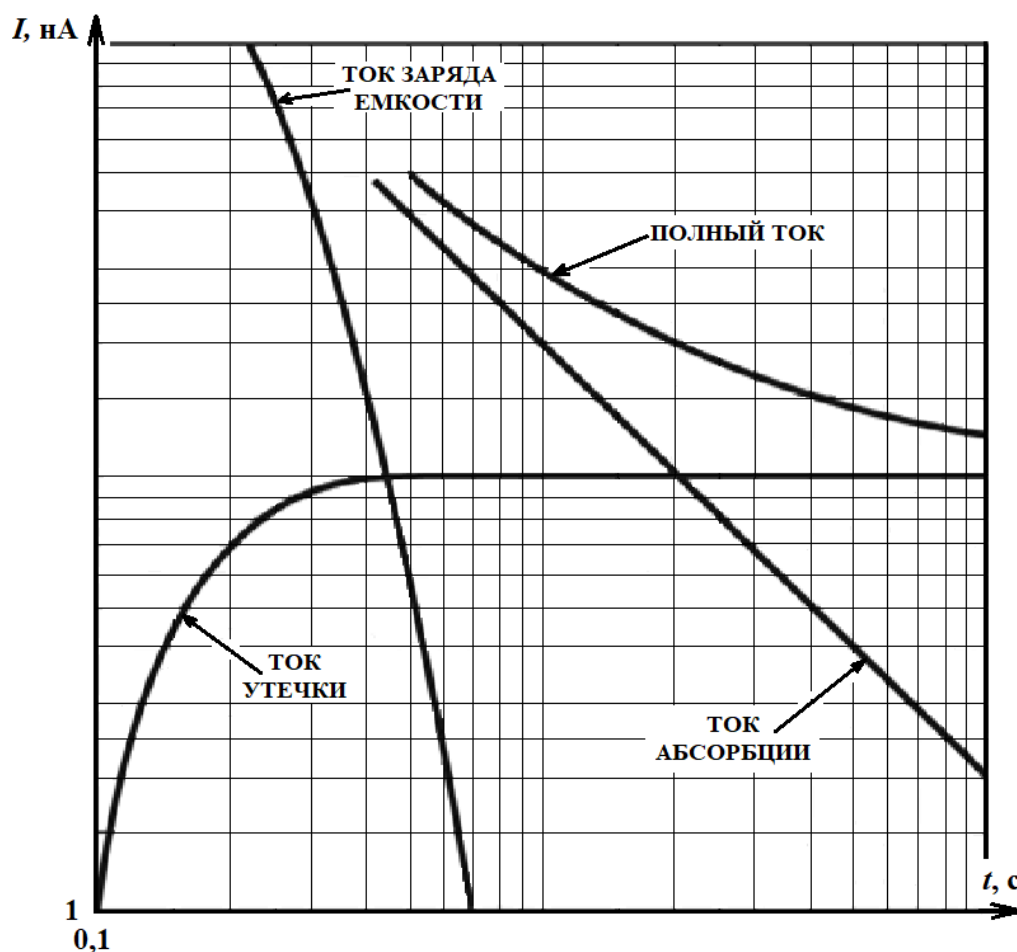


Рисунок 1.4 – Временные диаграммы составляющих полного тока при измерении сопротивления изоляции кабеля

Из рисунка 1.4 видно, что ток заряда емкости уменьшается относительно быстро по мере того, как заряжается контролируемая изоляция. Для кабелей с большей емкостью потребуется больше времени для зарядки. Также из диаграмм следует, что ток абсорбции уменьшается медленно и значительно влияет на время установления полного тока. Ток абсорбции вызван поляризацией молекул диэлектрического материала [23, 26, 27].

1.2 Классификация методов измерения сопротивления изоляции кабельных изделий

В настоящее время известно четыре основных метода, которые применяются для измерения больших сопротивлений [27-34]:

- метод непосредственной оценки;
- метод вольтметра-амперметра;
- мостовой метод;
- метод заряда-разряда конденсатора.

Как правило, измерение больших сопротивлений проводят на постоянном токе, либо на низких частотах.

1.2.1 Методы непосредственной оценки

Из методов непосредственной оценки для измерения сопротивления изоляции кабельных изделий нашли применение [31]:

- метод стабилизированного тока в цепи делителя;
- метод преобразования сопротивления в напряжение.

1.2.1.1 Метод стабилизированного тока в цепи делителя

Схема измерения сопротивления методом стабилизированного тока показана на рисунке 1.5. К делителю напряжения подключено питание источника опорного напряжения $U_{оп}$. Сам делитель состоит из известного образцового $R_{обр}$ и измеряемого R_x сопротивлений. На образцовом резисторе происходит падение напряжения, которое усиливается операционным усилителем (ОУ) с большим входным сопротивлением. Выходное напряжение ОУ $U_{вых}$ зависит от значения сопротивления R_x . В качестве индикатора (И) обычно применяется микроамперметр, шкала которого градуируется в единицах сопротивления. Если

усилитель имеет коэффициент усиления K и входное сопротивление $R_{вх} \gg R_{обр}$, то измеряемое сопротивление определяется выражением [35]:

$$R_x = \left(\frac{K \cdot U_{он}}{U_{вых} - 1} \right) \cdot R_{обр} \quad (1.5)$$

Это схема омметра используется для измерения достаточно больших сопротивлений (до 100 ТОм), когда $R_x > R_{обр}$.

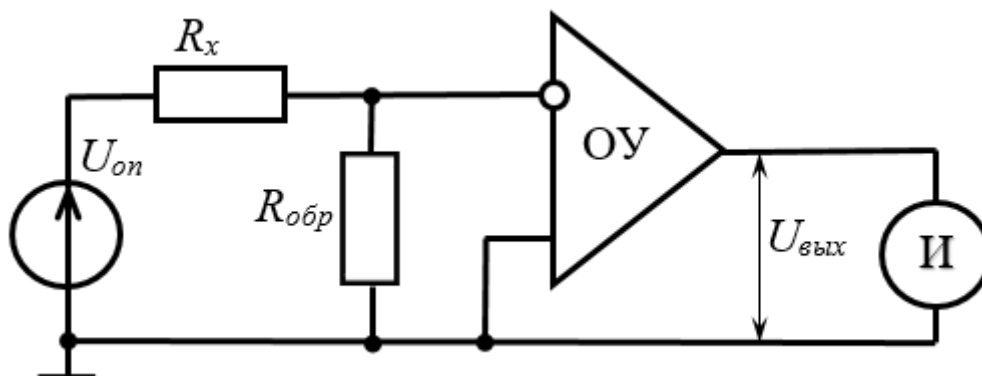


Рисунок 1.5 – Схема измерения сопротивления по методу стабилизированного тока

По данному методу в СССР было разработано большое количество приборов для измерения сопротивления [34]. Прибор Е6-3 до сих пор выпускается и занимает бюджетный сегмент рынка (до 15 тыс. руб.). Он обладает следующими характеристиками: опорное напряжение 105 В; предел измерения до 10 ТОм с погрешностью не более $\pm 20\%$. Про быстродействие прибора при контроле сопротивления изоляции, обладающей емкостной составляющей, в технической документации не упоминается. Время успокоения стрелки прибора для предела измерения 10 ТОм – не более 15 с.

Достоинства:

- простота реализации измерительного преобразователя;
- низкая стоимость приборов;

Недостатки:

- низкая помехозащищенность метода при контроле сопротивления изоляции, обладающей емкостной составляющей.

1.2.1.2 Метод преобразования сопротивления в напряжение

Измерение средних и больших (до 10^6 ТОм) сопротивлений осуществляется с использованием преобразования измеряемого сопротивления в пропорциональное ему напряжение. В основе метода лежит принцип работы ОУ постоянного тока с отрицательной обратной связью (Рисунок 1.6). Для схемы, показанной на рисунке 1.6, измеряемое сопротивление R_x можно выразить следующей формулой:

$$R_x = \frac{R_{обр} \cdot U_{он}}{U_{вых}}, \quad (1.6)$$

где $U_{вых}$ – выходное напряжение усилителя; $R_{обр}$ – образцовый резистор; $U_{он}$ – опорное напряжение.

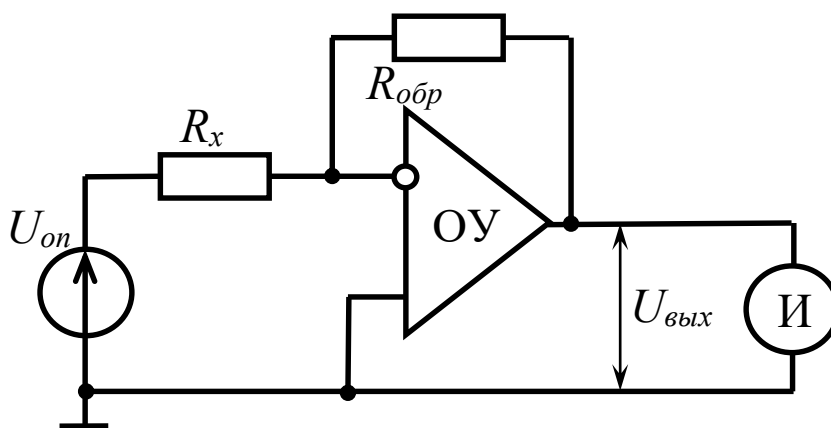


Рисунок 1.6 – Схема преобразования сопротивления в напряжение

При постоянных значениях $U_{он}$ и $R_{обр}$ напряжение $U_{вых}$ будет зависеть только от R_x и, следовательно, шкала индикатора может быть отградуирована в единицах сопротивления. Данная схема используется для измерения больших сопротивлений и реализована в тераомметрах ЕК6-7, Е6-13, Е6-14 [31, 34]. Тераомметр ЕК6-7 имеет верхний предел измерения сопротивления 10^5 ТОм при погрешности $\pm 10\%$. Прибор предназначен для измерения сопротивления резисторов. Про быстродействие в технических характеристиках на прибор не упоминается.

Также на основе данного метода работает прибор Keithley 6517b, который имеет верхний предел измерения сопротивления до 200 ТОм при погрешности

($\pm 1,15\%$ + 1 ГОм). Производитель заявляет, что в ручном режиме прибор способен измерять сопротивление до 10^6 ГОм, которое рассчитывается из известного опорного напряжения (до 1000 В) и измеренного тока. Стоит отметить, что указанные характеристики справедливы, если контроль сопротивления резистора или изоляционного материала проводится в специальной экранированной камере. Предоставляемая производителем камера Keithley 8009 позволяет контролировать тонколистовые (не более 3,175 мм) образцы. Ширина и длина образцов должна быть не более 102 мм. В документации на прибор [5] приводится информация, что на пределе измерения до 20 ГОм быстродействие зависит от времени установления источника опорного напряжения и предварительного усилителя. На пределе измерения свыше 20 ГОм быстродействие зависит от характеристик нагрузки. Следовательно, для контроля сопротивления изоляции кабеля Keithley 6517b не применим. Стоимость прибора Keithley 6517b около 800 тыс. руб., камеры Keithley 8009 – 200 тыс. руб.

Недостатки:

- для обеспечения точности измерений сопротивления необходима специальная экранированная камера;
- метод не используется для контроля сопротивления изоляции, у объектов, имеющих емкостную составляющую (кабели, конденсаторы и прочее) из-за своего низкого быстродействия.

Достоинства:

- предел измерения сопротивления до 10^6 ГОм.

1.2.2 Мостовой метод

Одинарный мост постоянного тока (Рисунок 1.7) содержит четыре резистора, соединенных в кольцевой замкнутый контур. Резисторы R_1 , R_2 , R_3 и R_4 этого контура называются плечами моста, а точки соединения соседних плеч –

вершинами моста. Цепи, соединяющие вершины, называют диагоналями. Диагональ ab содержит источник питания и называется диагональю питания.

Диагональ cd , в которую включен И, называется измерительной диагональю. В мостах постоянного тока в качестве И обычно используется гальванометр.

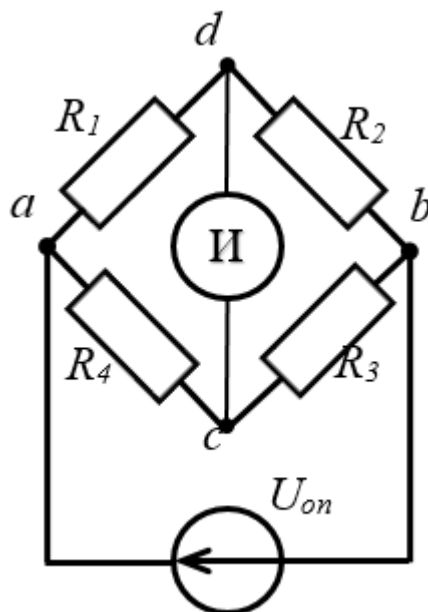


Рисунок 1.7 – Схема одинарного моста постоянного тока

В уравновешенном состоянии, когда ток через гальванометр не течет, измеряемое сопротивление R_1 равно [31, 34]:

$$R_1 = \frac{R_2 \cdot R_4}{R_3}, \quad (1.7)$$

Основная погрешность уравновешенного моста определяется чувствительностью гальванометра, чувствительностью схемы, погрешностью сопротивлений плеч [36, 37]. Усовершенствованная схема моста позволяет измерять сопротивление до 1000 ТОм [38, 39], но на данном пределе мост характеризуется низкой помехозащищенностью и поэтому не используется для контроля сопротивления изоляции кабелей.

На современном рынке приборов для контроля сопротивления изоляции кабельных изделий данный метод реализован в ряде приборов российской фирмы СТЭЛЛ. Наилучшими характеристиками обладает прибор РЕЙС-205: верхний

предел измерения сопротивления изоляции 50 ГОм, погрешность не нормируется; на пределе измерения сопротивления изоляции 10 ГОм, погрешность 10 % при опорном напряжении 200 В. Информация про быстродействие в технической документации на прибор отсутствует. Для устранения влияния на результаты измерений помех в виде переменных наведенных потенциалов, переменных напряжений и импульсов, измерения в приборе РЕЙС-205 выполняются с усреднением [40]. Цена от 120 тыс. руб.

Недостатки: малое значение верхнего предела измерения; высокая погрешность; плохая помехозащищенность.

Достоинства: независимость показаний от нестабильности источника опорного напряжения.

1.2.3 Метод вольтметра-амперметра

Этот метод очень популярен, потому что приборы необходимые для выполнения данного контроля обычно доступны в любой лаборатории [41]. Для измерения больших сопротивлений используется схема, представленная на рисунке 1.8. Измеренное значение сопротивления определяется по следующей формуле [29, 31, 42, 43]:

$$R_x = \frac{U}{I_x}, \quad (1.8)$$

где U – показания вольтметра V ; I_x – показания амперметра A .

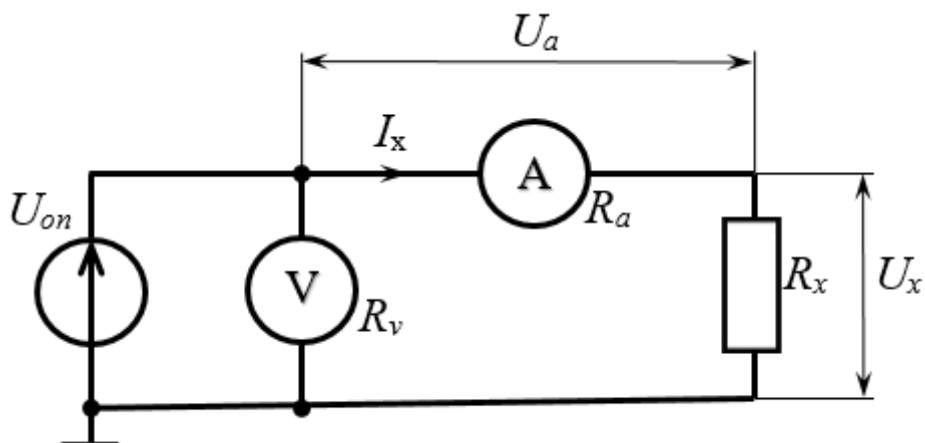


Рисунок 1.8 – Схема измерения больших сопротивлений методом вольтметра-амперметра

Измеренное значение сопротивления R_x было бы равно истинному значению R , если сопротивление амперметра равнялось нулю, а сопротивление вольтметра бесконечности. На практике же сопротивление амперметра очень маленькое по сравнению с измеряемым сопротивлением, поэтому не вносит погрешности и им можно пренебречь.

Следовательно, данную схему следует применять при измерении больших значений сопротивления [29, 42].

На данном методе разработано множество приборов для контроля сопротивления изоляции. Лучшим из них по характеристикам является прибор фирмы Sonel MIC-10k: верхний предел измерения сопротивления 40 ТОм при опорном напряжении 10000 В, погрешность не указана; на пределе измерения сопротивления 20 ТОм погрешность $\pm (12,5 \% \text{ и.в.} + 10 \text{ е.м.р.})$; время измерения задается оператором; для фильтрации сильных электромагнитных помех используется цифровая фильтрация [44]. Цена от 315 тыс. руб.

Также с использованием метода вольтметра-амперметра работает ряд приборов контроля сопротивления изоляции фирмы Hioki. Флагманом среди них является IR3455. Он обладает следующими техническими характеристиками: верхний предел измерения до 10 ТОм при опорном напряжении 5000 В с погрешностью $\pm (30 \% + 50 \text{ е.м.р.})$ [45]. Погрешность превышает допустимое

значение, указанное в [4]. Про быстроедействие в документации на прибор не упоминается. Цена от 200 тыс. руб.

К достоинствам метода можно отнести приемлемый для контроля изоляции кабелей предел измерения.

Недостатки:

- высокое опорное напряжение на верхних пределах измерения;
- высокая погрешность измерения при контроле изоляции кабельных изделий.

При измерении сопротивления объектов, имеющих большую емкость, быстроедействие метода определяется в основном быстроедействием вольтметра и амперметра, поскольку объект подключается к источнику напряжения с низким внутренним сопротивлением, а сопротивление амперметра очень мало. Тем не менее, учитывая, что большинство амперметров выполняется на основе инвертирующего операционного усилителя, в процессе измерения могут возникать нежелательные переходные процессы, увеличивающие время установления показаний [9].

1.2.4 Метод заряда-разряда конденсатора

В этом методе (Рисунок 1.9) измеряемое сопротивление изоляции R_x параллельно соединено с конденсатором C и электростатическим вольтметром V . Конденсатор, с помощью источника питания с напряжением U_{on} , заряжается до опорного напряжения, а затем разряжается через сопротивление. Напряжение на выводах контролируемого сопротивления наблюдается в течение времени разряда конденсатора [27, 29, 34].

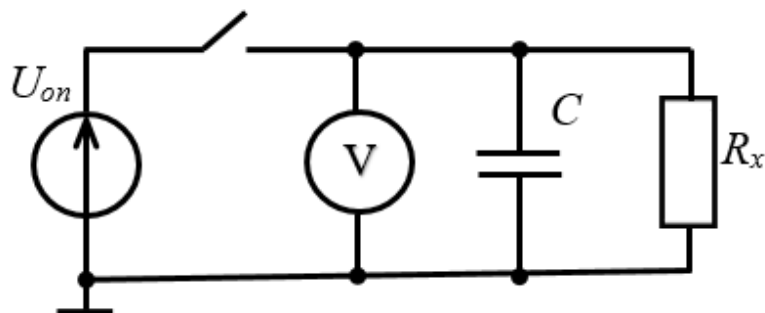


Рисунок 1.9 – Схема измерения сопротивления методом заряда-разряда конденсатора

Напряжение на конденсаторе в момент времени t , после подачи опорного напряжения, равно:

$$U_C = U_{on} \cdot e^{-t/C \cdot R_x} \quad (1.9)$$

Таким образом, сопротивление изоляции равно:

$$R_x = \frac{t}{C \cdot \ln \frac{U_{on}}{U_C}} \quad (1.10)$$

Изменение напряжения U_C от времени показано на рисунке 1.10.

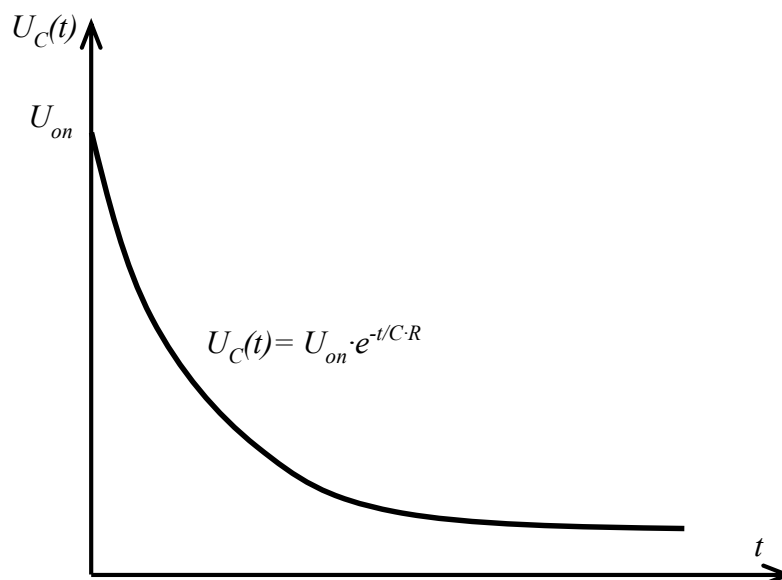


Рисунок 1.10 – Зависимость напряжения от времени

Если значение сопротивления R_x очень большое, то переходный процесс займет много времени. Кроме того, длительный переходный процесс будет иметь

плоский вид и при измерении начального напряжения U_{on} и конечного напряжения U_C , будет значительная погрешность, что приведет к погрешности измеренного значения сопротивления изоляции.

Это изменение напряжения может быть измерено с помощью гальванометра.

Данный метод применим для измерения больших сопротивлений, но его недостатком является необходимость в конденсаторе с большим сопротивлением утечки, сопоставимым с измеряемым сопротивлением.

На практике, при разработке прибора по этому методу, должна быть применена коррекция, учитывающая влияние сопротивления электростатического вольтметра и сопротивления утечки конденсатора. На рисунке 1.11 R_I представляет собой сопротивление вольтметра и конденсатора [29].

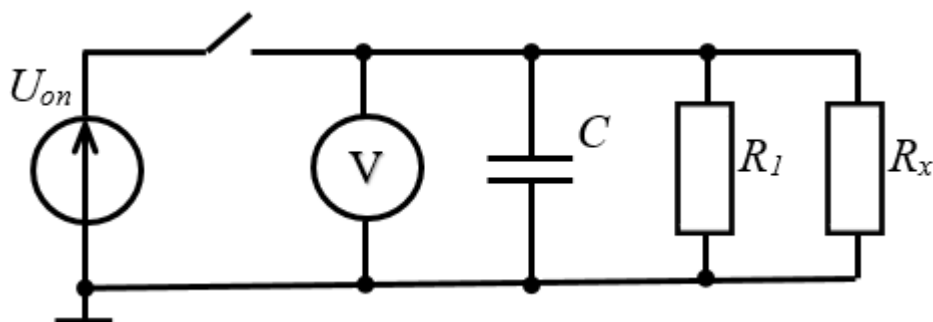


Рисунок 1.11 – Схема измерения сопротивления методом заряда-разряда конденсатора

Сопротивление утечки вольтметра также не учитывается.

С использованием данного метода работают приборы контроля сопротивления изоляции фирмы Fluke. Наилучшими характеристиками из них обладает Fluke 1555: верхний предел измерения до 2 ТОм с погрешностью 20 % при опорном напряжении 10000 В; скорость заряда для емкостной нагрузки 5 с/мкФ; скорость разряда для емкостной нагрузки 1,5 с/мкФ [46].

Главное достоинство метода заряда-разряда конденсатора перед остальными методами – быстроедействие. Разработано достаточное количество алгоритмов [8, 10, 11, 47], которые позволяют определять установившееся

значение измеряемого сопротивления на начальном этапе заряда (разряда) емкостной нагрузки.

Недостатки: высокое опорное напряжение; большая погрешность измерения.

1.2.5 Метод преобразования сопротивления в напряжение с интегрированием

Схема преобразователя, основанная по принципу биквадратного звена активного фильтра [48], показана на рисунке 1.12 [9].

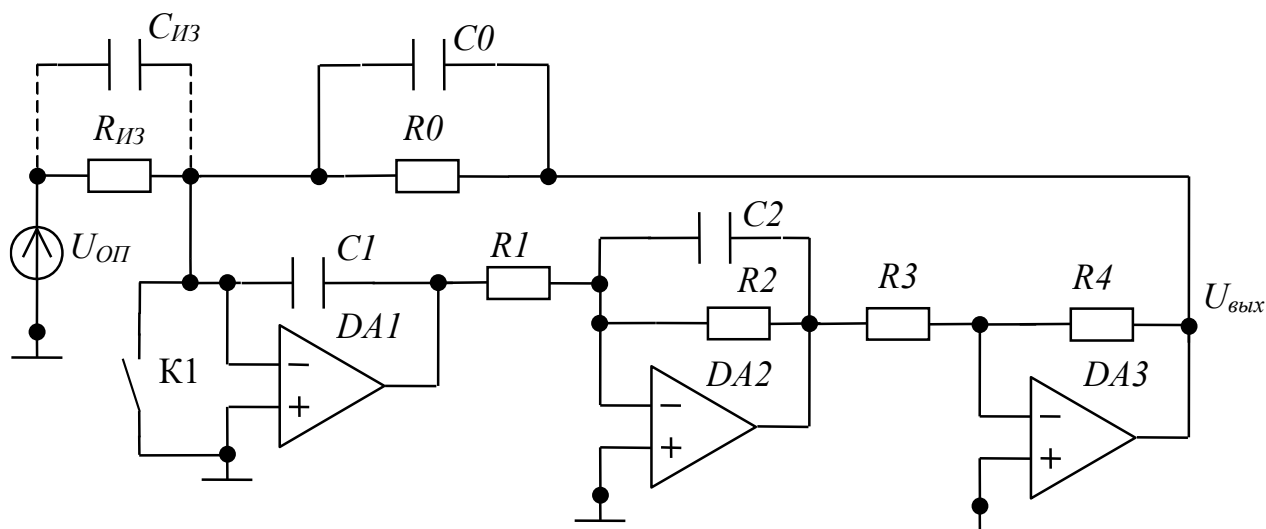


Рисунок 1.12 – Схема измерения сопротивления на основе преобразователя сопротивлений с интегратором в первом каскаде

В данной схеме имеется возможность выбирать емкости $C0$, $C1$, $C2$ и коэффициенты передачи по постоянному току усилителей на основе ОУ $DA2$, $DA3$ (сопротивления $R1 - R4$).

В первом каскаде стоит электрометрический усилитель $DA1$, имеющий малый входной ток и смещение нуля. Интегрирующий конденсатор $C1$ имеет емкость 700 пФ.

Фильтр низких частот в данной схеме выполнен на основе двух инвертирующих операционных усилителей $DA2$ и $DA3$.

При использовании в первом каскаде ОУ с низким входным током (единицы фА) можно добиться следующий характеристик прибора: верхний предел измерения до 100 ТОм при опорном напряжении 100 В. Быстродействие преобразователя не более 10 с.

Основной недостаток преобразователя плохая защита от низкочастотных помех при контроле сопротивления изоляционных материалов.

1.3 Выводы по Главе 1

1. Приведен литературный обзор кабелей, проводов, шнуров. Описаны варианты их конструктивного устройства, а также используемые в кабельной промышленности материалы для изготовления проводников и изоляции. Определены основные электрические характеристики кабельных изделий, по которым контролируется их качество. Приведено обоснование использования в экспериментах упрощенной схемы замещения реального кабеля для измерения сопротивления изоляции.

2. Приведены основные требования ГОСТ 3345-76 «Кабели, провода, шнуры. Метод определения электрического сопротивления изоляции», которым установлены: рабочее напряжение для измерения сопротивления изоляции кабельных изделий; погрешность измерения; время измерения (быстродействие).

3. Выполнен обзор существующих методов и приборов измерения больших сопротивлений. Проведен их анализ на соответствие требованиям ГОСТ 3345-76 с указанием достоинств и недостатков. Для осуществления контроля сопротивления изоляции кабельных изделий выбран метод преобразования сопротивления в напряжение. Существующие приборы, основанные на данном методе, обладают хорошим быстродействием и приемлемой помехозащищенностью по сравнению с приборами, выполненными на основе других методов.

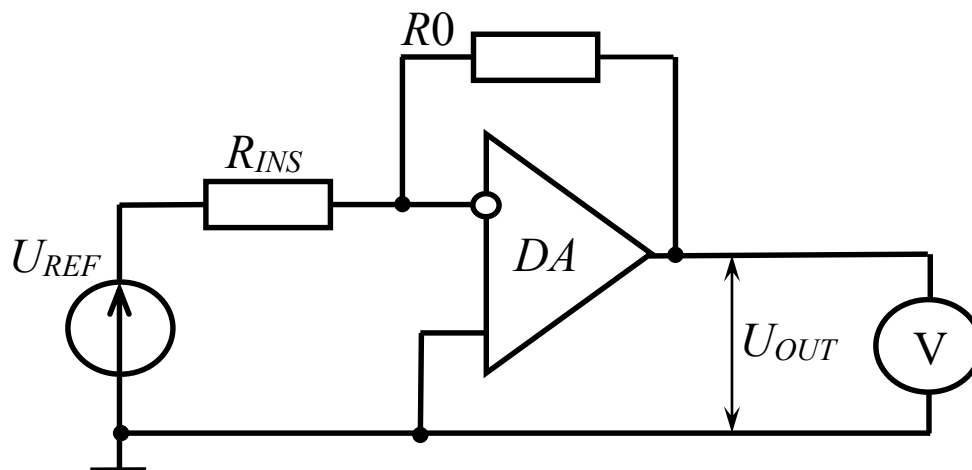
ГЛАВА 2. УВЕЛИЧЕНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ И ТОЧНОСТИ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Из проведенного в Главе 1 исследования был выбран наиболее перспективный метод 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 усовершенствованию метода в плане его быстродействия.

2.1 Особенности применения Т-образной обратной связи

Широкое распространение получили тераомметры, имеющие схему преобразователя сопротивления в напряжение с обратной шкалой, на основе операционного усилителя (Рисунок 2.1). Преимущества тераомметров, работающих по данному принципу, в том, что они работают при равном нулю синфазном сигнале, обладают относительно хорошей помехоустойчивостью [9, 37, 49].

Основное требование, предъявляемое к таким тераомметрам – это низкий входной ток операционного усилителя. Что позволяет увеличить верхний предел измерения прибора. Из современных выпускаемых операционных усилителей следует выделить: AD549 [50], ADA4530-1 (Analog Devices) [51]; LTC6268 (Linear Technology) [52]; OPA128 (Texas Instruments) [53]. Все вышеперечисленные микросхемы имеют входной ток менее 100 фА, что теоретически позволяет измерять сопротивление до 1000 ТОм, при источнике опорного напряжения 100 В. Основные характеристики ОУ с низким входным током указаны в таблице 2.1.



DA – операционный усилитель; U_{REF} – источник опорного напряжения; R_{INS} – сопротивление изоляции; R_0 – образцовое сопротивление

Рисунок 2.1 – Преобразователь сопротивления в напряжение с обратной шкалой, на основе операционного усилителя

Таблица 2.1 – Основные характеристики ОУ с низким входным током

	I_{IN} , фА ¹	U_{OF} , мкВ ²	R_{IN} , ТОм ³	C_{IN} , пФ ⁴	U_{SUP} , В ⁵
AD549L	±60	±500	1000	0,8	±15
ADA4530-1	±20	±40	>100	8	±8
LTC6268	±20	±700	>1	0,1	+5
OPA128LM	±75	±500	1000	2	±15

¹ Входной ток ОУ; ² напряжение смещения ОУ; ³ входное сопротивление ОУ; ⁴ входная емкость ОУ; ⁵ напряжение питания ОУ.

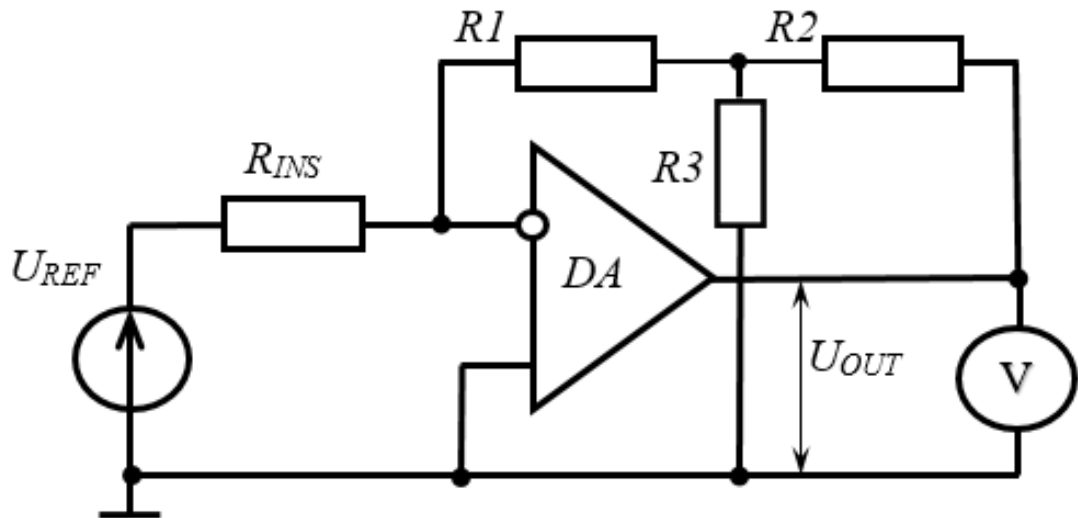
Если использовать идеальный ОУ, то выходное напряжение тераомметра равно [54]:

$$U_{OUT(ID)} = -U_{REF} \cdot \frac{R_0}{R_{INS}}, \quad (2.1)$$

Из формулы (2.1) видно, что чем больше сопротивление R_0 в цепи обратной связи, тем большее сопротивление возможно измерить. Однако, как правило, чем больше сопротивление резистора, тем меньше его точность. Поэтому для обеспечения малой погрешности тераомметра сопротивление обратной связи необходимо выбирать как можно меньшего номинала (менее 1 ГОм). К примеру,

высокоомные прецизионные резисторы Riedon HVS в диапазоне от 1 ГОм до 100 ГОм имеют погрешность 1 – 2%. В то время как, в диапазоне от 1 МОм до 1 ГОм погрешность составляет 0,25 – 0,5%, что в 4 раза меньше. Однако с уменьшением сопротивления обратной связи одновременно уменьшается и амплитуда выходного напряжения преобразователя сопротивления [55].

Теоретически применение Т-образной обратной связи может помочь решить данное противоречие (Рисунок 2.2).



$R1, R2, R3$ – сопротивления Т-образной связи

Рисунок 2.2 – Преобразователь сопротивления в напряжение с Т-образной обратной связью

В этом случае для получения устойчивого полезного сигнала потребуются резисторы с меньшими номиналами. Если использовать идеальный операционный усилитель, то уравнение преобразования для данной схемы, описывается выражением [54, 56]:

$$U_{OUT(ID)} = -U_{REF} \cdot \frac{R1 + R2 + \frac{R1 \cdot R2}{R3}}{R_{INS}} = -U_{REF} \cdot \frac{R_{EQ}}{R_{INS}}, \quad (2.2)$$

где R_{EQ} – эквивалентное сопротивление обратной связи усилителя; $U_{OUT(ID)}$ – выходное напряжение преобразователя с Т-образной обратной связью при идеальном ОУ.

Уравнение (2.2) не учитывает многие параметры операционного усилителя (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, анализ целесообразно выполнять в программах симуляции электрических схем.

Цель данного раздела работы заключалась в экспериментальном и теоретическом исследовании применимости Т-образной обратной связи в тераомметрах, и определению, при каких условиях схема сохраняет работоспособность.

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 $U_{OUT(ID)}$ использовано выражение (2.2).

Во всех экспериментах использовался источник постоянного напряжения $U_{REF} = 100$ В. В качестве входного операционного усилителя *DA1* применялись ADA4530-1, с входным током менее 20 фА в диапазоне температур от -40 до +85 °С и AD549L, с входным током менее 60 фА в диапазоне температур от 0 до +70 °С.

В работах [9, 55, 57] показано, что для обеспечения защиты от помех усилитель тераомметра должен иметь трехкаскадную структуру с интегратором в первом каскаде. Данная схема является наиболее эффективной, поэтому она использовалась при проведении экспериментов и моделировании. На рисунке 2.3 представлена электрическая схема исследуемого тераомметра.

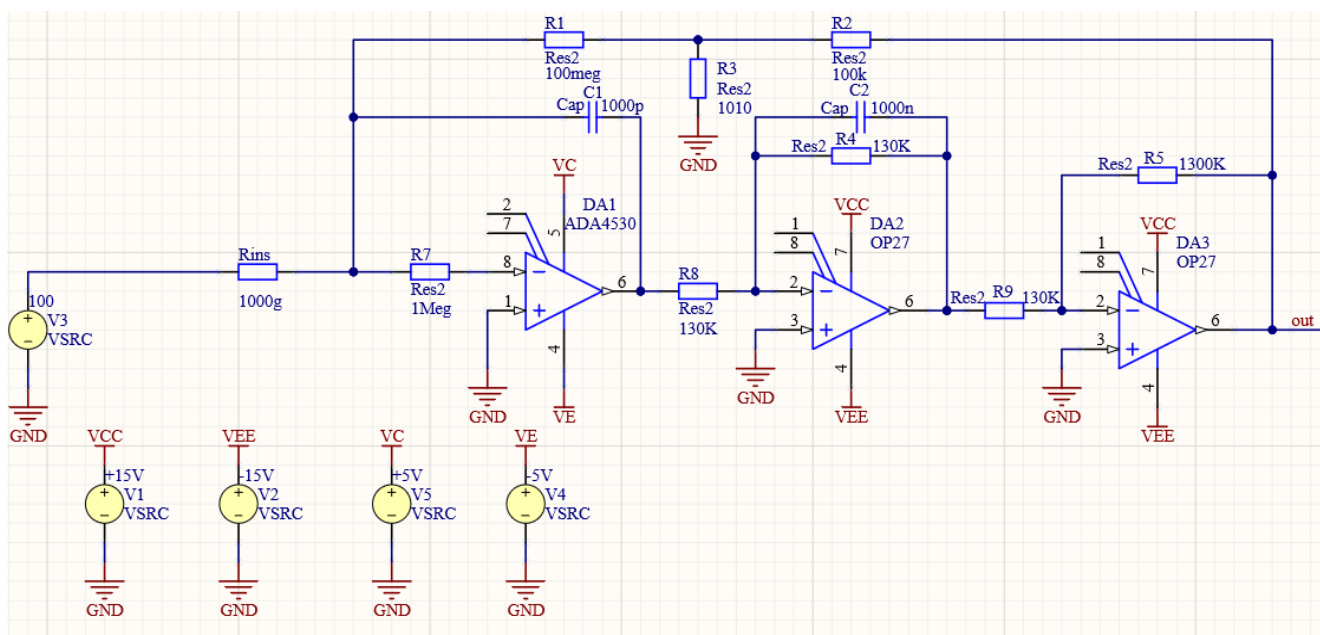


Рисунок 2.3 – Электрическая схема исследуемого тераомметра в программе симуляции Altium Designer

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 этом можно убедиться, проанализировав результаты измерений при постоянном номинале сопротивления $R1$ и варьирующихся $R2$ и $R3$ (Таблица 2.2). Приведенные данные получены с входным ОУ ADA4530-1.

Таблица 2.2 – Различные сочетания сопротивлений $R2$ и $R3$ ($R_{EQ}=const$)

$R1$, МОм	$R2$, кОм	$R3$, Ом	R_{EQ} , ГОм	R_{INS} , ГОм	$U_{OUT(ID)}$, мВ	$U_{OUT(T)}$, мВ
10	10	101	1	100	1000	996,1
10	100	1010	1	100	1000	996,2
10	1000	10110	1	100	1000	996,1
10	10	101	1	1000	100	96,03
10	100	1010	1	1000	100	96,04
10	1000	10110	1	1000	100	96,04

Продолжение таблицы 2.2.

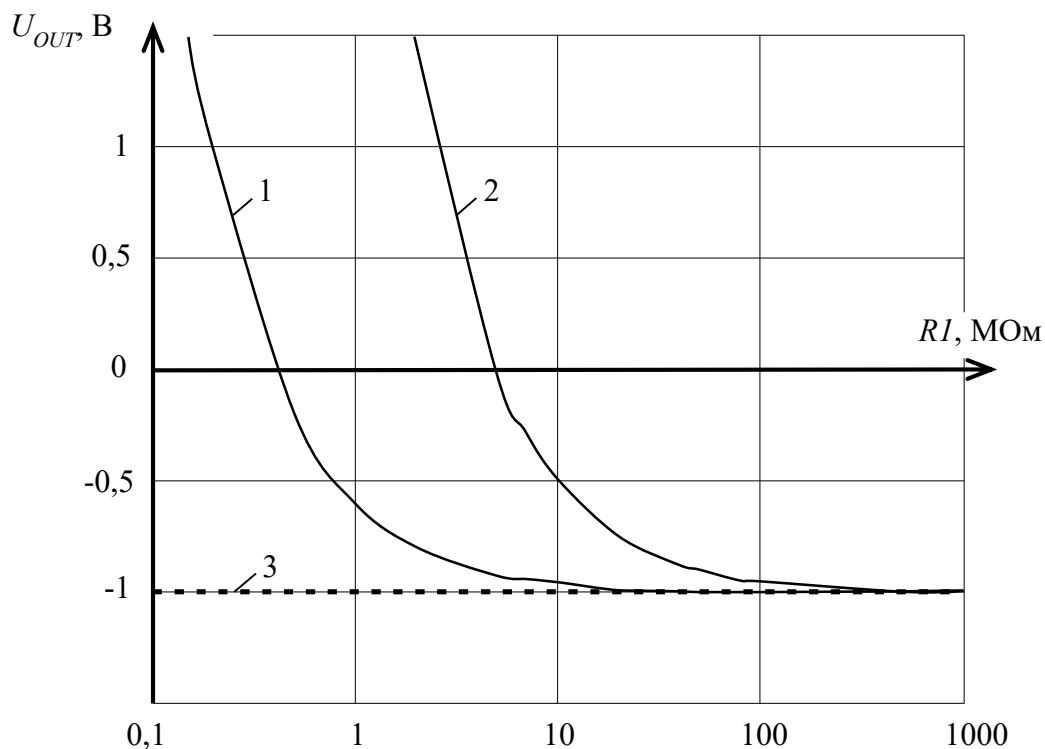
100	10	101	10	1000	1000	996,3
100	100	1010	10	1000	1000	996,3
100	1000	10100	10	1000	1000	996,4
100	10	101	10	10000	100	96,2
100	100	1010	10	10000	100	96,2
100	1000	10100	10	10000	100	96,2

В то же время, изменение номинала сопротивления $R1$ оказывает влияние на выходной сигнал. На рисунке 2.4 представлены зависимости выходного напряжения от изменения образцового сопротивления $R1$ Т-образной обратной связи, при $R_{EQ}=const$.

Из полученных в результате моделирования данных следует 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:

$$U_{OUT.OF} = \frac{R_{EQ}}{(R1 + R3)} \cdot U_{OF}, \quad (2.3)$$

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

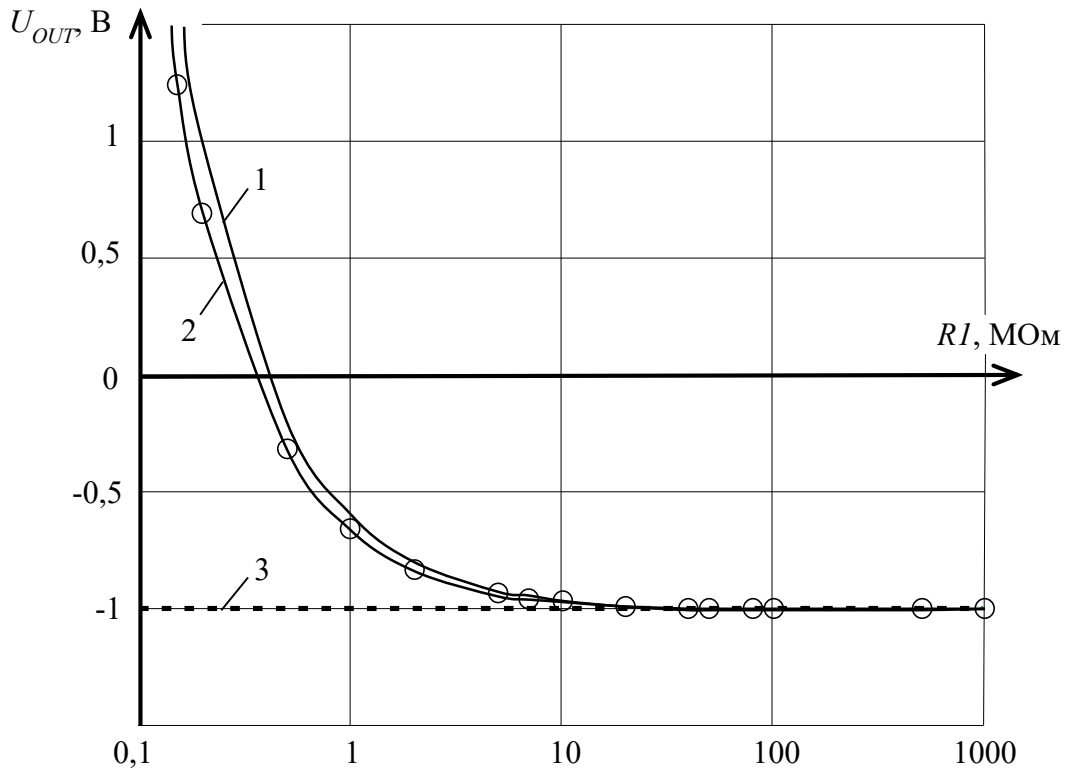


1 – теоретическая зависимость $U_{OUT(T)}$ с входным ОУ ADA4530-1; 2 – теоретическая зависимость $U_{OUT(T)}$ с входным ОУ AD549L; 3 – теоретическая зависимость, при идеальном ОУ $U_{OUT(ID)}$

Рисунок 2.4 – Зависимости выходного напряжения от изменения образцового сопротивления RI Т-образной обратной связи ($R_{EQ}=10$ ГОм, $R_{INS}=1$ ТОм, $U_{REF}=100$ В)

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 (Таблица 2.1) наиболее подходящим вариантом входного ОУ является ADA4530-1, который совмещает в себе низкий входной ток и низкое напряжение смещения. Во всех дальнейших экспериментах будет использоваться данный ОУ.

Сравним полученные экспериментальные и теоретические зависимости выходного напряжения от изменения образцового сопротивления RI Т-образной обратной связи, при $R_{EQ}=const$ (Рисунок 2.5).



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

Из графика на рисунке 2.5 видно, что экспериментальная зависимость $U_{OUT(EXP)}$ идентична 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 используется максимально возможное напряжение смещения 40 мкВ.

Приведенные экспериментальные данные позволяют сделать следующий 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.

В результате выполнения работ было проведено исследование возможности применения Т-образной обратной связи в тераомметрах, основанных на преобразовании сопротивления в напряжение. Для этого был выбран операционный усилитель ADA4530-1, имеющий входной ток 20 фА, что теоретически позволяет измерять сопротивление до 5000 ТОм, при источнике опорного напряжения 100 В.

Экспериментально было выяснено, что зависимость выходного напряжения преобразователя с Т-образной обратной связью не зависит от сочетания сопротивлений R_2 и R_3 , при условии, что они обеспечивают одинаковое эквивалентное сопротивление $R_{EQ}=const$. В то же время изменение сопротивления R_1 оказывает существенное влияние на выходной сигнал. Как показали экспериментальные данные, применение Т-образной обратной связи позволяет уменьшить номинал образцового сопротивления минимум в 100 раз. А если при разработке тераомметра предусматривать напряжение смещения ОУ и проводить его компенсацию на этапе калибровки прибора, то можно добиться уменьшения образцового сопротивления в 1000 и более раз.

2.1. Быстродействие ПСН с Т-образной обратной связью

При отсутствии режима насыщения у операционных усилителей происходит быстрое установление показаний средств контроля сопротивления изоляции кабельных изделий (тераомметров). В практических условиях тераомметр входит в режим насыщения и установление показаний происходит длительный промежуток времени, который может достигать нескольких часов. В работах [9, 34] разработано схемотехническое решение, позволяющее значительно увеличить быстродействие тераомметров, работающих по принципу преобразования сопротивления в напряжение.

Суть данного метода заключается во введении ключевого элемента в инвертирующий ОУ (Рисунок 2.6).

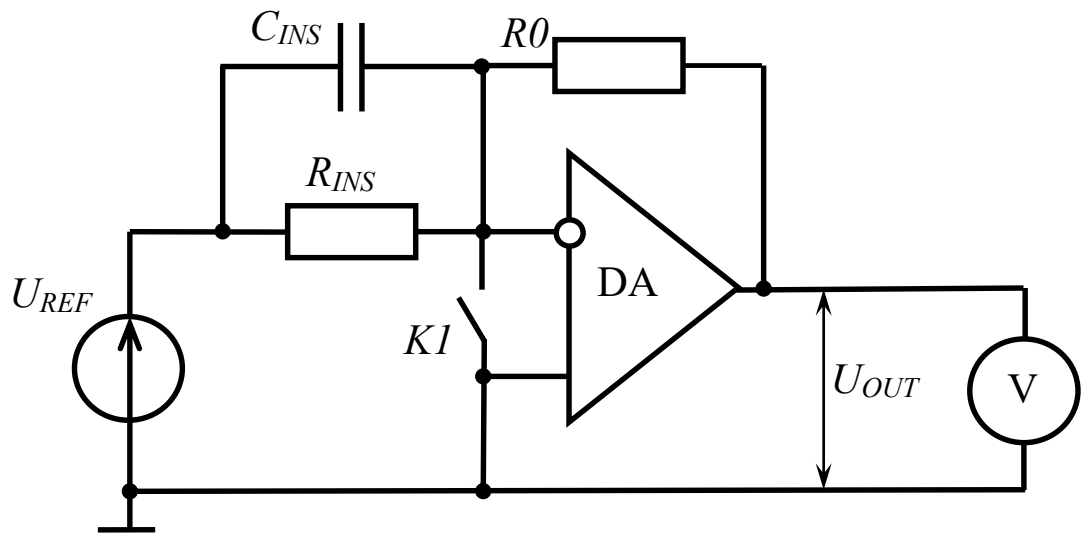


Рисунок 2.6 – Преобразователь сопротивления в напряжение, работающий в ключевом режиме

При экспериментальных исследованиях автором получено быстродействие не более 10 с при образцовом сопротивлении $R_0 = 1$ ГОм, измеряемом сопротивлении $R_{INS} = 100$ ГОм, емкости кабеля $C_{INS} = 50$ нФ. Ключ $K1$ замыкался на 3 с и в это время происходил заряд емкости кабеля большим током, что и обеспечило быстродействие. Полученное быстродействие преобразователя сопротивления в напряжение с ключевым элементом в 4-5 раз лучше, чем у аналогичного преобразователя, не работающего в ключевом режиме. Но, данная схема является не защищенной от помех промышленной частоты, и на больших пределах измерения ОУ переходит в режим насыщения. Поэтому в преобразователе требуется использование фильтрующих элементов, что в свою очередь значительно увеличит время установления показаний. Также, при использовании преобразователя на максимальных пределах измерения, необходимо учитывать сопротивление изоляции ключевого элемента, чтобы не вызвать смещение полезного сигнала. Поэтому следует выбирать ключевые элементы с большим сопротивлением изоляции, например, реле SIL Series фирмы Meder electronic и D-HR Series фирмы Cynergy3 Components Ltd, которые имеют

сопротивление изоляции 100 ГОм. Стоимость таких реле и аналогов более 5 тыс. руб.

2.2.1 Теоретическое исследование быстродействия ПСН с Т-образной обратной связью

Первоначально для исследования быстродействия ПСН с Т-образной обратной связью необходимо промоделировать процесс измерения сопротивления изоляции кабельных изделий в программе симуляции электрических схем Altium Designer.

В качестве значений измеряемых величин емкости и сопротивления использовались справочные характеристики кабелей, которые выпускаются промышленностью в настоящее время. Максимальным сопротивлением изоляции (50 ГОм·км), в совокупности с достаточно большой электрической емкостью (100 нФ/км), обладают коаксиальные подводные кабели (Таблица 2.3) [16, 19, 20, 22, 58-62]. Соответственно, постоянная времени таких кабелей может достигать до 5000 с. Поэтому данные соотношения значений сопротивления изоляции и электрической емкости кабеля будут выбраны, как максимально возможные.

Таблица 2.3 – Справочные характеристики кабелей

Тип кабеля	R_{INS} не менее, ГОм·км	C_{INS} не менее, нФ/км	Номинальное напряжение, кВ
Коаксиальный подводный кабель (изоляция жилы из ПЭ, внешняя оболочка из ПЭ)	50	100	3,5
Кабель управления (изоляция жилы из ПЭ, внешняя оболочка из ПВХ)	2	370	0,3
Кабель управления (изоляция из ПВХ, экранированный, небронированный)	25	450	0,3/0,5

Продолжение таблицы 2.3.

Кабель передачи данных (изоляция жилы из ПЭ, внешняя оболочка из ПВХ)	10	52	0,15
Кабель для тяговых цепей, безгалогенный	0,1	60	0,3
Силовой кабель с изоляцией из СПЭ и внешней оболочкой из ПВХ	0,1	800	0,6/1,0
Искробезопасный кабель (оболочка из ПВХ устойчивая к ультрафиолетовому излучению и атмосферным воздействиям, является самозатухающей и негорючей)	0,02	140	0,6/1,0
Кабель передачи данных локальной сети	5	50	0,15
Коаксиальный телевизионный кабель	10	67	3,5

На рисунке 2.7 представлена электрическая схема исследуемого ПСН. Помехозащищенность и быстродействие данного ПСН, в первую очередь зависит от значения емкости конденсатора C_I в интеграторе. При недостаточной емкости конденсатора C_I , уровень помех в преобразователе становится большим и операционный усилитель $DA1$ переходит в насыщение, что приводит к неработоспособности преобразователя. Поэтому существует необходимость подбора оптимального значения емкости конденсатора C_I , которое обеспечит работоспособность преобразователя в совокупности с его максимальным быстродействием.

Изменением значений R_{INS} и C_{INS} проводилась имитация 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 Подразделе 2.1. Под длительностью переходного процесса принималось время T_S , по истечении которого отличие

текущего значения переходного процесса от установившегося значения составляет 5%.

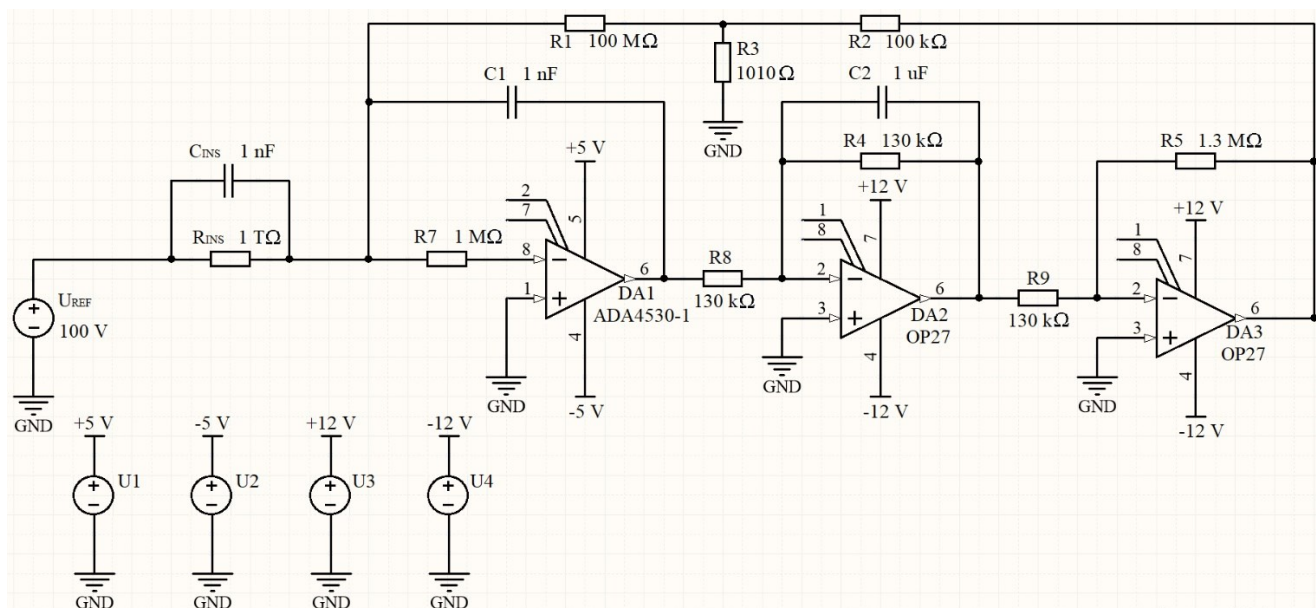
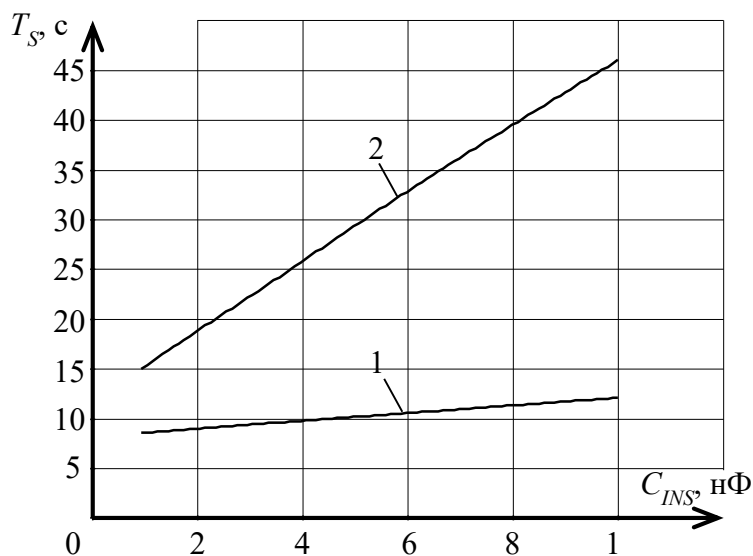


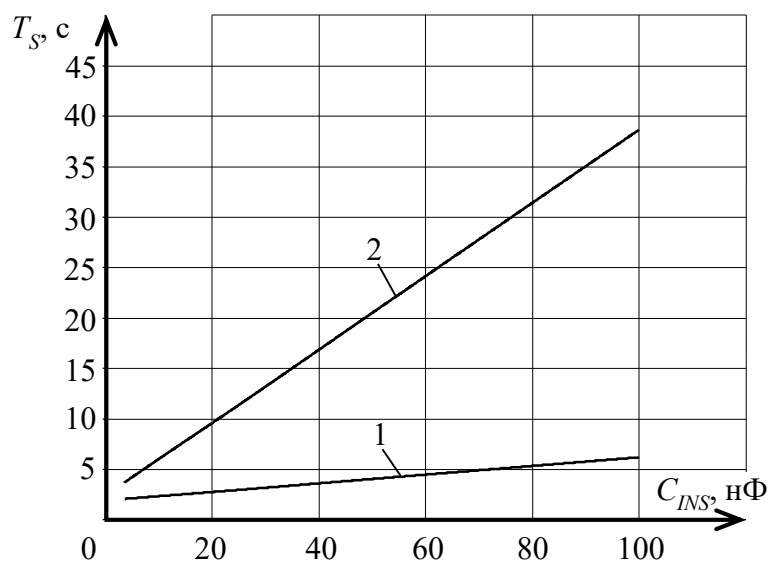
Рисунок 2.7 – Электрическая схема исследуемого тераомметра в программе симуляции Altium Designer

На рисунках 2.8 и 2.9 приведены результаты моделирования зависимости времени установления измеряемого сопротивления от емкости, при $C_I = 1$ нФ и измеряемых сопротивлениях 1 ТОм и 100 ГОм. При измерении сопротивления 10 ГОм выходное напряжение ПСН не устанавливается на всем исследуемом диапазоне емкости C_{INS} у преобразователя с классическим вариантом обратной связи ОУ, а преобразователь с Т-образной обратной связью оказался работоспособным только при емкости C_{INS} не более 100 нФ. Причем, установление выходного напряжения проходило с перерегулированием переходного процесса более 100% (Рисунок 2.10). Из этого можно сделать вывод, что ПСН, в данной конфигурации, имеет малый запас устойчивости на пределе измерения 10 ГОм. На пределе измерения 100 ГОм установление выходного напряжения также проходило с перерегулированием переходного процесса более 100%, но имело меньшее время перерегулирования и, соответственно, больший запас устойчивости. На пределе измерения 1 ТОм установление выходного напряжения – монотонное, без перерегулирования.



1 – теоретическая зависимость ПСН с Т-образной обратной связью ($R_1=100$ МОм, $R_2=100$ кОм, $R_3=1010$ Ом, $R_{EQ}=10$ ГОм); 2 – теоретическая зависимость ПСН с классической обратной связью $R_{EQ}=10$ ГОм

Рисунок 2.8 – Зависимость времени установления при измерении сопротивления изоляции от емкости ($R_{INS}=1$ ГОм, $C_I=1$ нФ, $U_{REF}=100$ В)



1 – теоретическая зависимость ПСН с Т-образной обратной связью ($R_1=10$ МОм, $R_2=100$ кОм, $R_3=1010$ Ом, $R_{EQ}=1$ ГОм); 2 – теоретическая зависимость ПСН с классической обратной связью $R_{EQ}=1$ ГОм

Рисунок 2.9 – Зависимость времени установления при измерении сопротивления изоляции от емкости ($R_{INS}=100$ ГОм, $C_I=1$ нФ, $U_{REF}=100$ В)

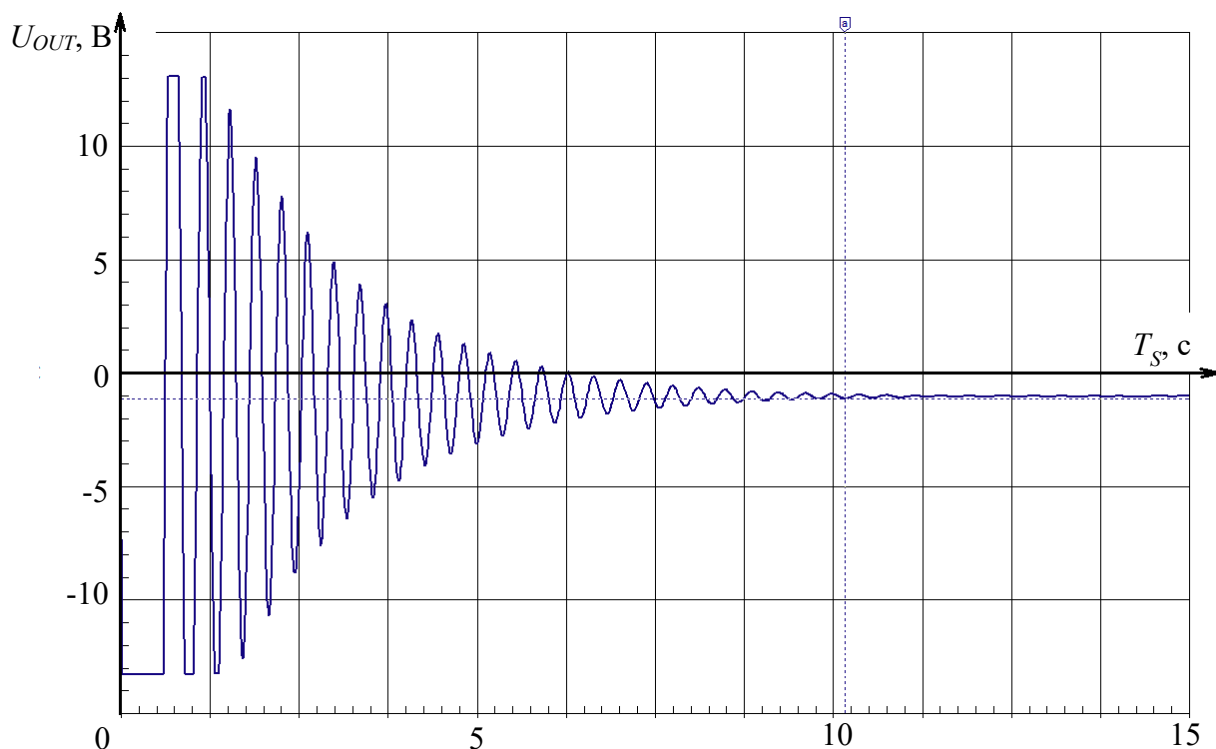


Рисунок 2.10 – Переходный процесс выходного напряжения ПСН с Т-образной обратной связью ($R1=1\text{ МОм}$, $R2=100\text{ кОм}$, $R3=1010\text{ Ом}$, $R_{EQ}=0,1\text{ ГОм}$, $R_{INS}=10\text{ ГОм}$, $C_{INS}=100\text{ нФ}$, $C1=1\text{ нФ}$, $U_{REF}=100\text{ В}$)

Из полученных зависимостей очевидно преимущество ПСН с Т-образной обратной связью:

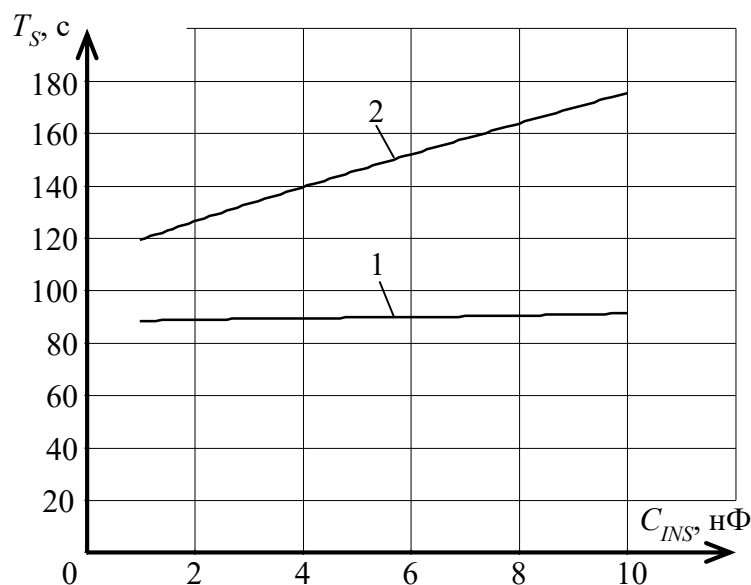
- время установления в меньшей степени зависит от емкостной составляющей контролируемого объекта, а на пределе измерения 1 ГОм имеет практически постоянное значение (около 10 с) во всем исследуемом диапазоне емкости;

- используемая схема ПСН позволила увеличить быстродействие в $(1,5\dots 6)$ раз, в зависимости от предела измерения сопротивления и значения емкости.

Также стоит отметить, что при данной конфигурации ПСН, время установления зависит от емкости, на исследуемом диапазоне, по линейному закону.

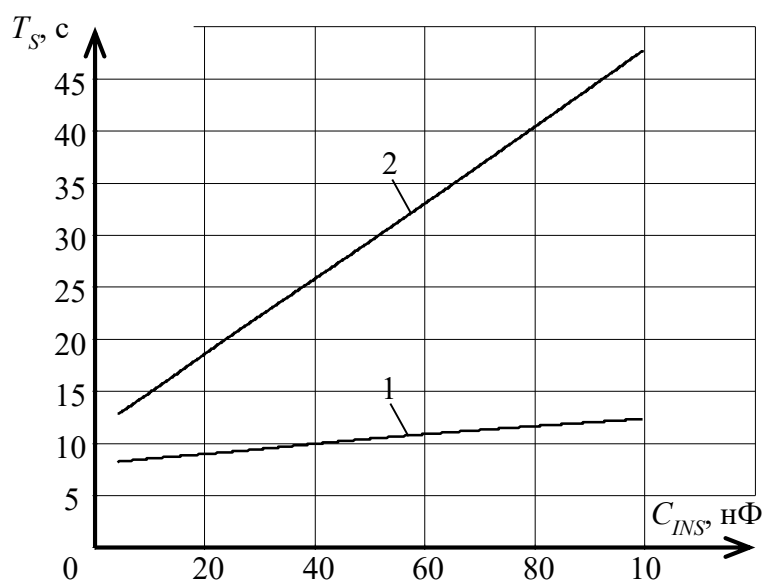
На рисунках 2.11 – 2.13 приведены результаты моделирования зависимости времени установления измеряемого сопротивления от емкости, при $C1=10\text{ нФ}$.

ПСН оказался работоспособным на всех рассматриваемых пределах измерения сопротивления.



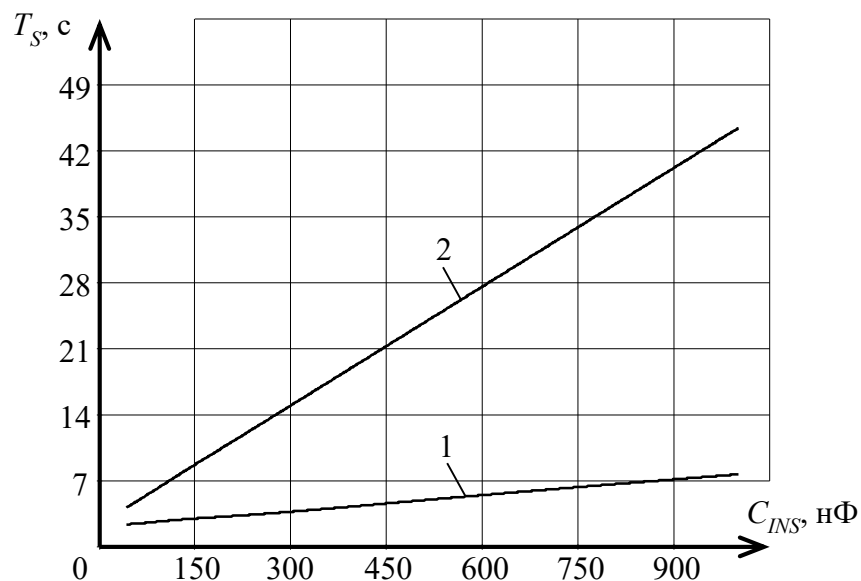
1 – теоретическая зависимость ПСН с Т-образной обратной связью ($R_I=100$ МОм, $R_2=100$ кОм, $R_3=1010$ Ом, $R_{EQ}=10$ ГОм); 2 – теоретическая зависимость ПСН с классической обратной связью $R_{EQ}=10$ ГОм

Рисунок 2.11 – Зависимость времени установления при измерении сопротивления изоляции от емкости ($R_{INS}=1$ ТОм, $C_I=10$ нФ, $U_{REF}=100$ В)



1 – теоретическая зависимость ПСН с Т-образной обратной связью ($R_I=10$ МОм, $R_2=100$ кОм, $R_3=1010$ Ом, $R_{EQ}=1$ ГОм); 2 – теоретическая зависимость ПСН с классической обратной связью $R_{EQ}=1$ ГОм

Рисунок 2.12 – Зависимость времени установления при измерении сопротивления изоляции от емкости ($R_{INS}=100$ ГОм, $C_I=10$ нФ, $U_{REF}=100$ В)



1 – теоретическая зависимость ПСН с Т-образной обратной связью ($R_I=1$ МОм, $R_2=100$ кОм, $R_3=1010$ Ом, $R_{EQ}=0,1$ ГОм); 2 – теоретическая зависимость ПСН с классической обратной связью $R_{EQ}=0,1$ ГОм

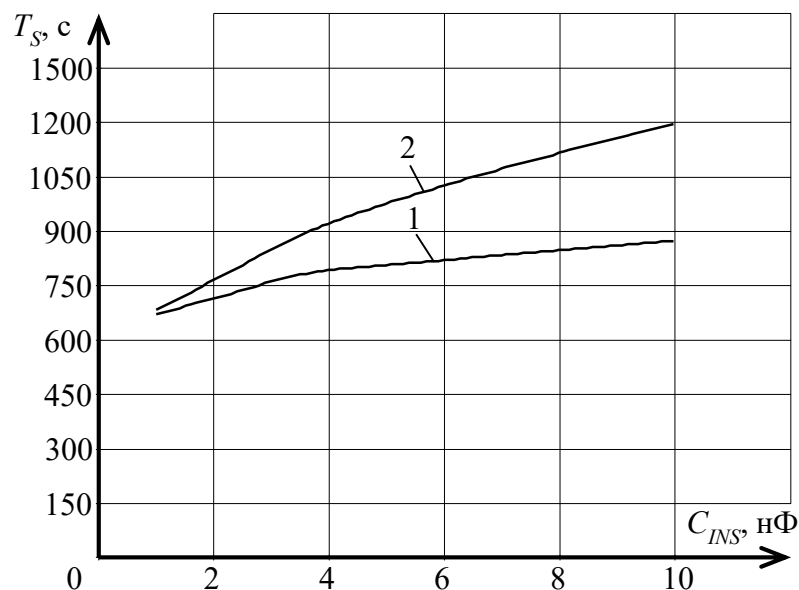
Рисунок 2.13 – Зависимость времени установления при измерении сопротивления изоляции от емкости ($R_{INS}=10$ ГОм, $C_I=10$ нФ, $U_{REF}=100$ В)

При измерении сопротивления 1 ТОм установление выходного напряжения – монотонное, без перерегулирования. Но из-за увеличения емкости интегратора значительно снизилось быстродействие. Характер зависимостей линейный.

На пределе измерения 100 ГОм установление выходного напряжения также проходило монотонно, без перерегулирования. Быстродействие изменилось незначительно как для ПСН с классической обратной связью, так и для ПСН с Т-образной обратной связью. Характер зависимостей линейный.

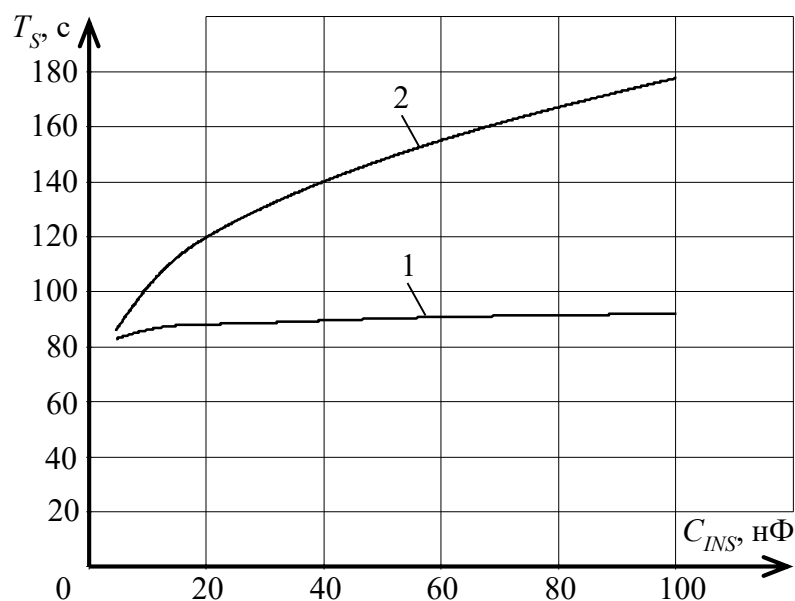
На пределе измерения 10 ГОм установление выходного напряжения проходило с перерегулированием переходного процесса более 100 %. Быстродействие ПСН с Т-образной обратной связью оказалось в (1,5...6) раз лучше, чем у классического варианта преобразователя.

На рисунках 2.14 – 2.16 приведены результаты моделирования зависимости времени установления измеряемого сопротивления от емкости, при $C_I=100$ нФ.



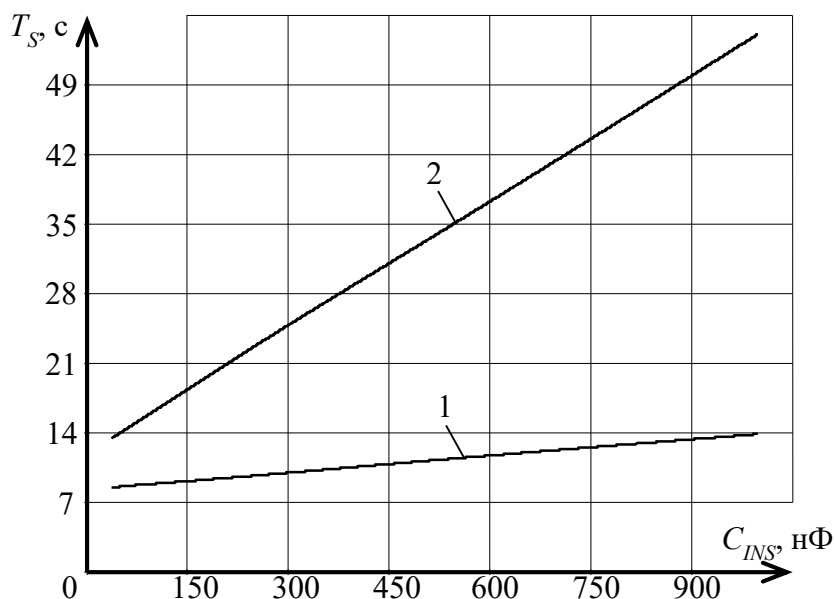
1 – теоретическая зависимость ПСН с Т-образной обратной связью ($R_1=100$ МОм, $R_2=100$ кОм, $R_3=1010$ Ом, $R_{EQ}=10$ ГОм); 2 – теоретическая зависимость ПСН с классической обратной связью $R_{EQ}=10$ ГОм

Рисунок 2.14 – Зависимость времени установления при измерении сопротивления изоляции от емкости ($R_{INS}=1$ ГОм, $C_I=100$ нФ, $U_{REF}=100$ В)



1 – теоретическая зависимость ПСН с Т-образной обратной связью ($R_1=10$ МОм, $R_2=100$ кОм, $R_3=1010$ Ом, $R_{EQ}=1$ ГОм); 2 – теоретическая зависимость ПСН с классической обратной связью $R_{EQ}=1$ ГОм

Рисунок 2.15 – Зависимость времени установления при измерении сопротивления изоляции от емкости ($R_{INS}=100$ ГОм, $C_I=100$ нФ, $U_{REF}=100$ В)



1 – теоретическая зависимость ПСН с Т-образной обратной связью ($R1=1$ МОм, $R2=100$ кОм, $R3=1010$ Ом, $R_{EQ}=0,1$ ГОм); 2 – теоретическая зависимость ПСН с классической обратной связью $R_{EQ}=0,1$ ГОм

Рисунок 2.16 – Зависимость времени установления при измерении сопротивления изоляции от емкости ($R_{INS}=10$ ГОм, $CI=100$ нФ, $U_{REF}=100$ В)

На всех рассматриваемых пределах измерения сопротивления установление выходного напряжения проходило монотонно, без перерегулирования.

Из данных, представленных на рисунке 2.14 следует, что значительное увеличение инерционности недопустимо, так как установление выходного напряжения занимает более 5 минут, что не соответствует требованиям ГОСТ 3345-76. Также стоит отметить, что преимущество ПСН с Т-образной обратной связью по быстродействию оказалось незначительным в сравнении с классическим вариантом ПСН.

На пределах измерения 10 ГОм и 100 ГОм характер зависимостей времени установления от емкости близок к линейному. Быстродействие лучше у ПСН с Т-образной обратной связью.

2.2.2 Экспериментальное исследование быстродействия ПСН с Т-образной обратной связью

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 по упрощенной схеме (Рисунок 1.3) параллельным подключением резистора типа КВМ и конденсатора типа К71-7 (Рисунок 2.17) [63, 64]. Их технические характеристики приведены в таблице 2.4.

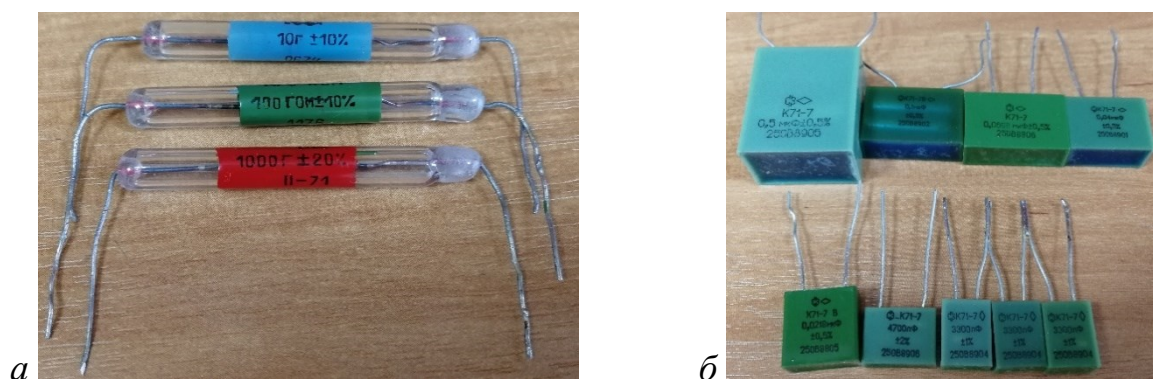


Рисунок 2.17 – Внешний вид резистора типа КВМ (а) и конденсатора типа К71-7 (б)

Таблица 2.4 – Технические характеристики резистора типа КВМ и конденсатора типа К71-7

Наименование характеристики	К71-7	КВМ
Максимальное допустимое напряжение	250 В	100 В
Сопротивление изоляции вывод-вывод, не менее	50 ГОм	-
Сопротивление изоляции вывод-корпус, не менее	70 ГОм	-
Тангенс угла потерь, не более	0,001	-
Допускаемое отклонение от номинального значения	±0.5 %, ±1 %, ±2 %	±10 %, ±20 %

Как видно из таблицы 2.4, заявленное сопротивление изоляции конденсатора К71-7 вывод-вывод не менее 50 ГОм, что соизмеримо с номинальными значениями исследуемых сопротивлений R_{INS} . Экспериментально определено, что сопротивление изоляции конденсатора К71-7 на порядок превышает измеряемое сопротивление, поэтому не оказывает влияние на результат измерения сопротивления.

Значения сопротивлений и емкостей выбирались аналогично теоретическому исследованию. Принципиальная электрическая схема ПСН представлена на рисунке 2.7.

Во время проведения экспериментов по зависимости времени установления измеряемого сопротивления от емкости при $C1=1$ нФ и измеряемом сопротивлении 1 ГОм 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 2.18). Данный эффект вызван недостаточной помехозащищенностью преобразователя и не проявлялся при моделировании с аналогичными характеристиками электронных компонентов.

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

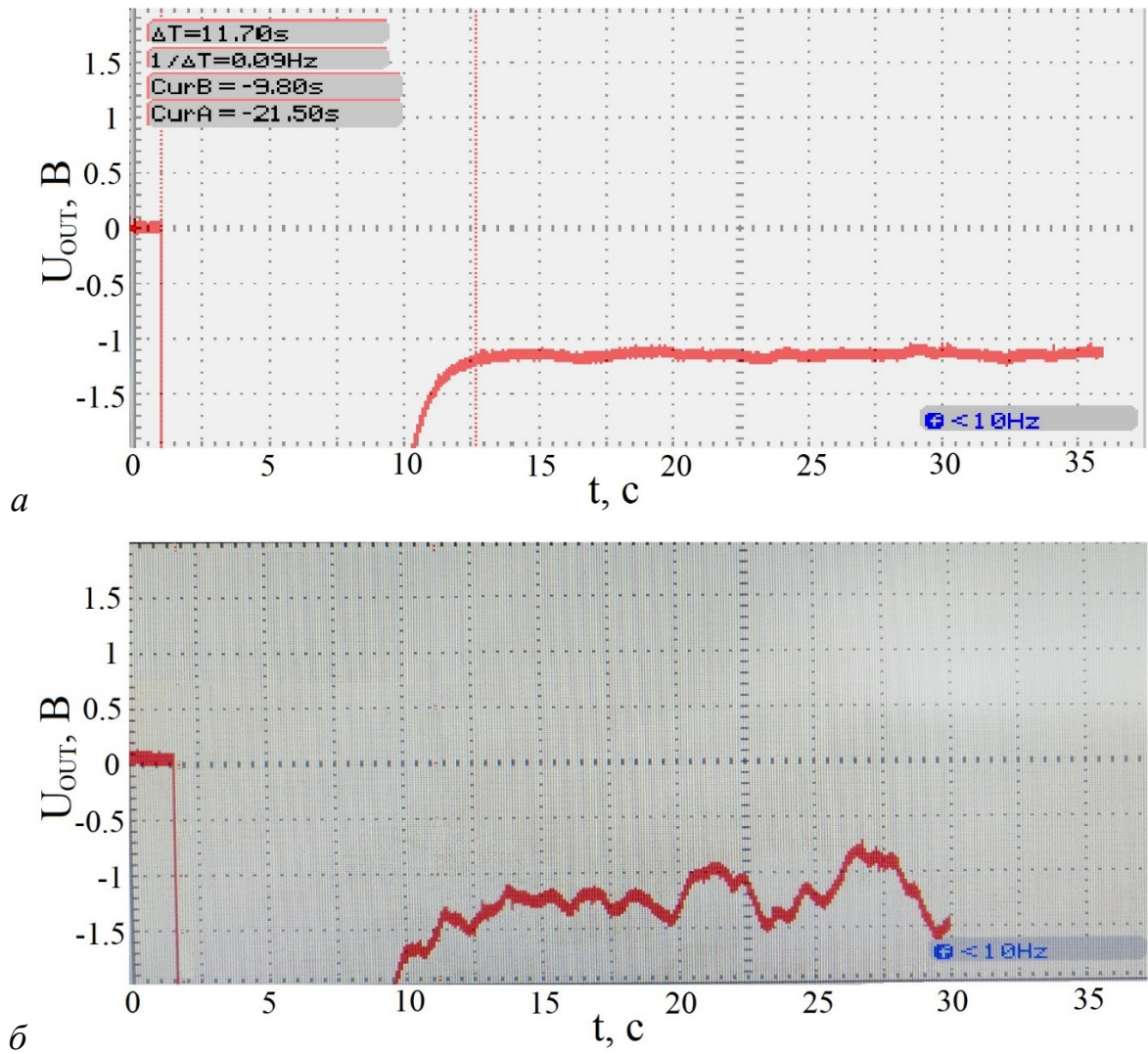
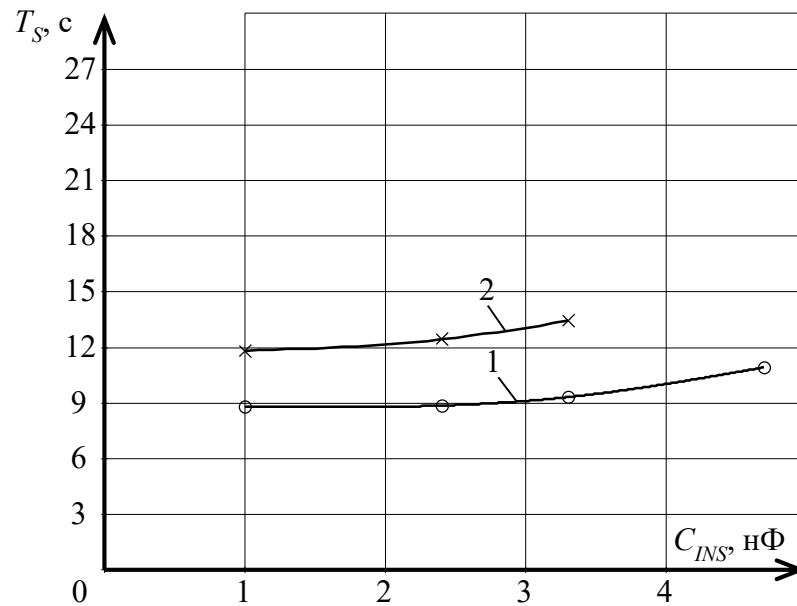


Рисунок 2.18 – Осциллограммы переходного процесса выходного напряжения ПСН ($U_{REF}=100$ В, $R_{EQ}=10$ ГОм, $R_{INS}=1$ ТОм, $C_{INS}=10$ нФ, $C_I=1$ нФ): с Т-образной обратной связью ($R1=100$ МОм, $R2=100$ кОм, $R3=1010$ Ом) (а) и с классической обратной связью (б)

На рисунке 2.19 представлена экспериментальная зависимость времени установления измеряемого сопротивления от емкости при $C_I=1$ нФ и измеряемом сопротивлении 1 ТОм.



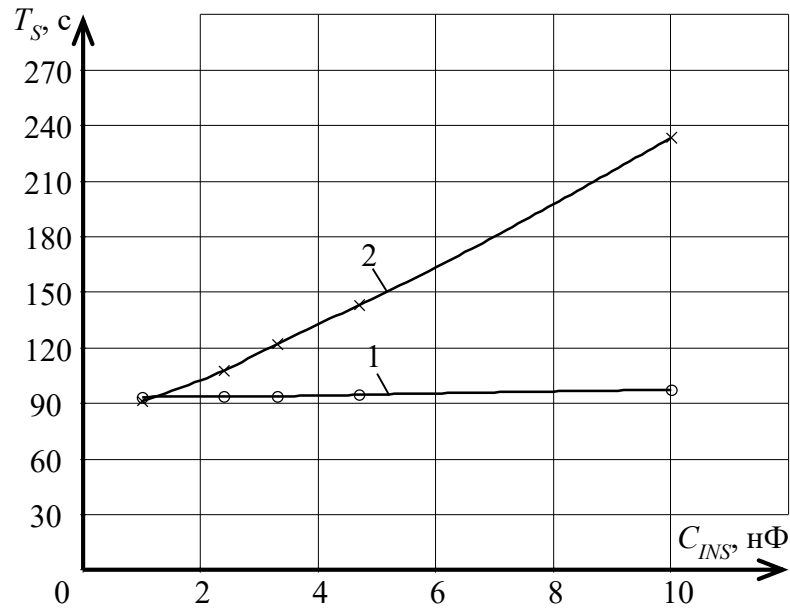
1 – экспериментальная зависимость ПСН с Т-образной обратной связью ($R_1=100$ МОм, $R_2=100$ кОм, $R_3=1010$ Ом, $R_{EQ}=10$ ГОм); 2 – экспериментальная зависимость ПСН с классической обратной связью $R_{EQ}=10$ ГОм

Рисунок 2.19 – Зависимость времени установления при измерении сопротивления изоляции от емкости ($R_{INS}=1$ ГОм, $C_I=1$ нФ, $U_{REF}=100$ В)

На рисунках 2.20 – 2.22 приведены экспериментальные зависимости времени установления измеряемого сопротивления от емкости, при $C_I=10$ нФ.

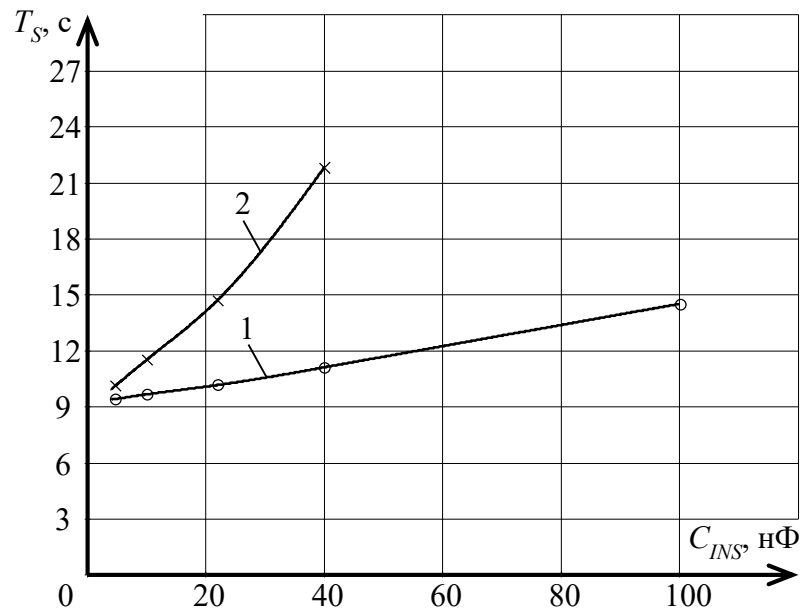
На пределах измерения сопротивления 100 ГОм и 1 ГОм установление выходного напряжения проходило монотонно, без перерегулирования. У преобразователя с классической обратной связью при $R_{INS}=100$ ГОм и C_{INS} более 40 нФ наблюдались самопроизвольные скачки сигнала, как и на представленном рисунке 2.18 б.

При $R_{INS}=10$ ГОм установление выходного напряжения проходило с перерегулированием переходного процесса более 100%. При C_{INS} более 200 нФ для ПСН с классической обратной связью и при C_{INS} более 500 нФ для ПСН с Т-образной обратной связью также наблюдались самопроизвольные скачки сигнала, что привело к неработоспособности преобразователя.



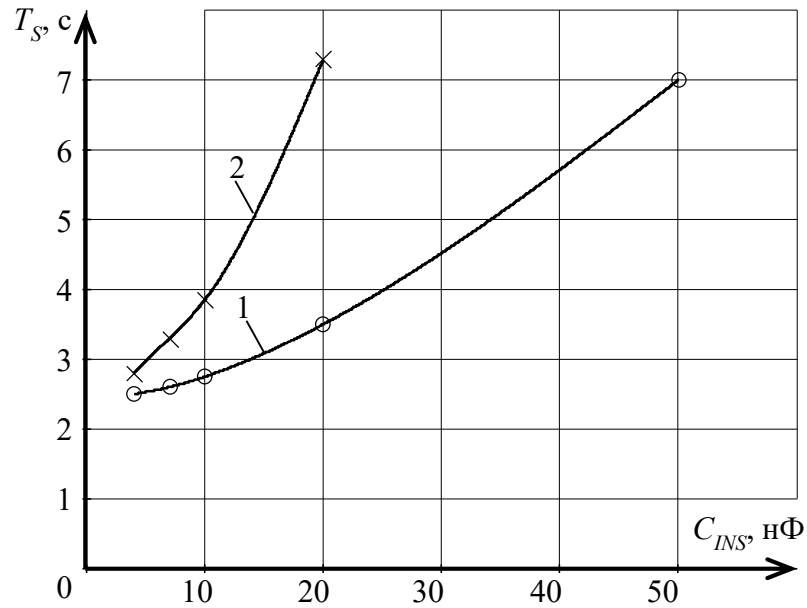
1 – экспериментальная зависимость ПСН с Т-образной обратной связью ($R_I=100$ МОм, $R_2=100$ кОм, $R_3=1010$ Ом, $R_{EQ}=10$ ГОм); 2 – экспериментальная зависимость ПСН с классической обратной связью $R_{EQ}=10$ ГОм

Рисунок 2.20 – Зависимость времени установления при измерении сопротивления изоляции от емкости ($R_{INS}=1$ ТОм, $C_I=10$ нФ, $U_{REF}=100$ В)



1 – экспериментальная зависимость ПСН с Т-образной обратной связью ($R_I=10$ МОм, $R_2=100$ кОм, $R_3=1010$ Ом, $R_{EQ}=1$ ГОм); 2 – экспериментальная зависимость ПСН с классической обратной связью $R_{EQ}=1$ ГОм

Рисунок 2.21 – Зависимость времени установления при измерении сопротивления изоляции от емкости ($R_{INS}=100$ ГОм, $C_I=10$ нФ, $U_{REF}=100$ В)



1 – экспериментальная зависимость ПСН с Т-образной обратной связью ($R1=1$ МОм, $R2=100$ кОм, $R3=1010$ Ом, $R_{EQ}=0,1$ ГОм); 2 – экспериментальная зависимость ПСН с классической обратной связью $R_{EQ}=0,1$ ГОм

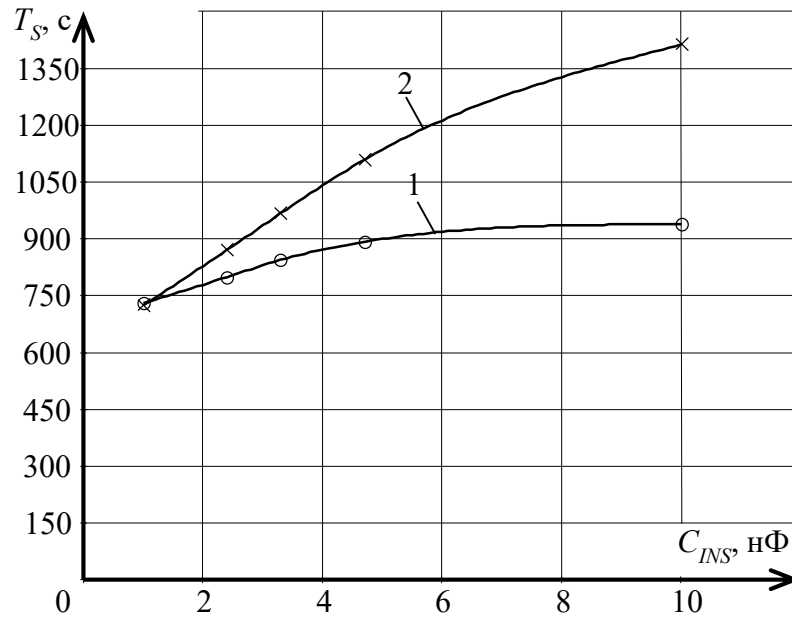
Рисунок 2.22 – Зависимость времени установления при измерении сопротивления изоляции от емкости ($R_{INS}=10$ ГОм, $C1=10$ нФ, $U_{REF}=100$ В)

На рисунках 2.23 – 2.25 показаны экспериментальные зависимости времени установления измеряемого сопротивления от емкости, при $C1=100$ нФ.

На всех рассматриваемых пределах измерения сопротивления установление выходного напряжения проходило монотонно, без перерегулирования.

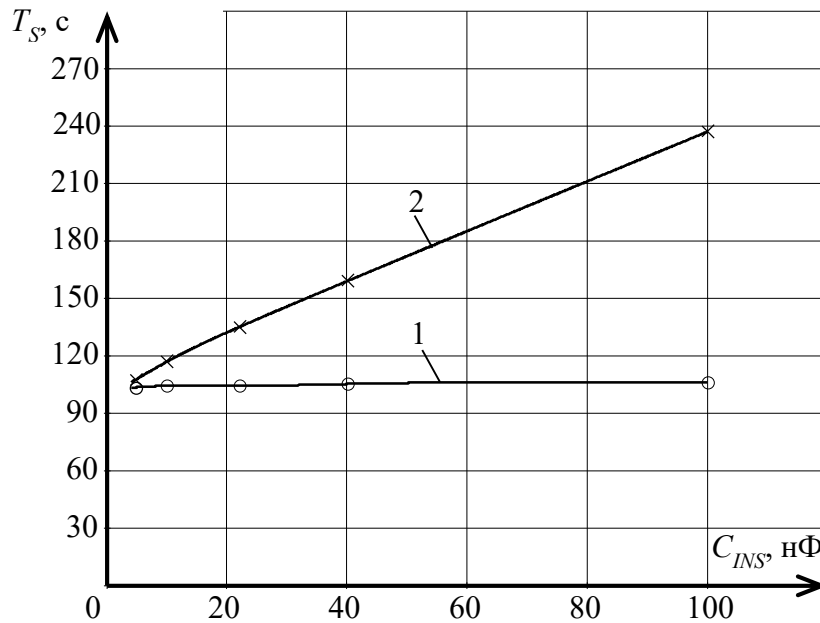
Аналогично моделированию, при измерении сопротивления 1 ТОм значительно увеличилась инерционность ПСН и время установления выходного напряжения занимает более 5 минут, что недопустимо.

На пределах измерения 10 ГОм и 100 ГОм характер зависимостей времени установления от емкости близок к линейному, причем у преобразователя с Т-образной обратной связью, в рассматриваемом диапазоне C_{INS} , он постоянный и не зависит от изменения емкостной составляющей. Быстродействие лучше у ПСН с Т-образной обратной связью.



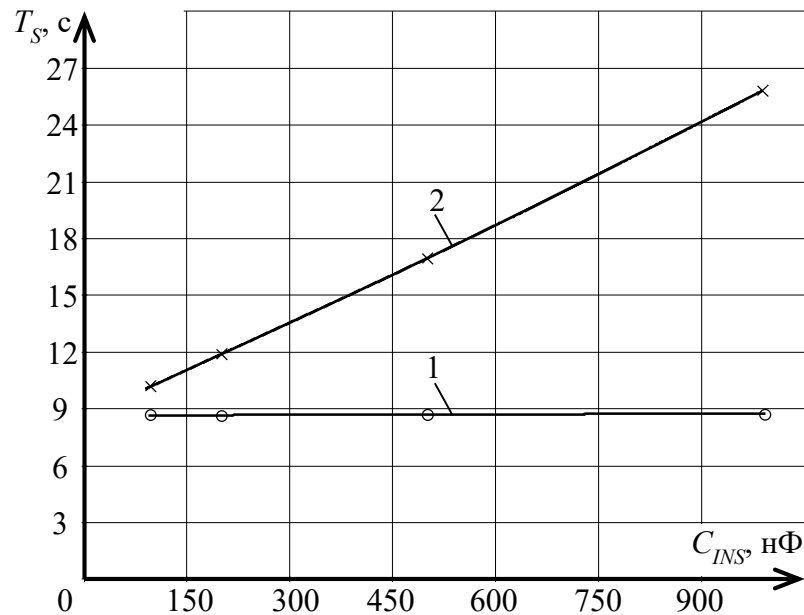
1 – экспериментальная зависимость ПСН с Т-образной обратной связью ($R_I=100$ МОм, $R_2=100$ кОм, $R_3=1010$ Ом, $R_{EQ}=10$ ГОм); 2 – экспериментальная зависимость ПСН с классической обратной связью $R_{EQ}=10$ ГОм

Рисунок 2.23 – Зависимость времени установления при измерении сопротивления изоляции от емкости ($R_{INS}=1$ ГОм, $C_I=100$ нФ, $U_{REF}=100$ В)



1 – экспериментальная зависимость ПСН с Т-образной обратной связью ($R_I=10$ МОм, $R_2=100$ кОм, $R_3=1010$ Ом, $R_{EQ}=1$ ГОм); 2 – экспериментальная зависимость ПСН с классической обратной связью $R_{EQ}=1$ ГОм

Рисунок 2.24 – Зависимость времени установления при измерении сопротивления изоляции от емкости ($R_{INS}=100$ ГОм, $C_I=100$ нФ, $U_{REF}=100$ В)



1 – экспериментальная зависимость ПСН с Т-образной обратной связью ($R1=1$ МОм, $R2=100$ кОм, $R3=1010$ Ом, $R_{EQ}=0,1$ ГОм); 2 – экспериментальная зависимость ПСН с классической обратной связью $R_{EQ}=0,1$ ГОм

Рисунок 2.25 – Зависимость времени установления при измерении сопротивления изоляции от емкости ($R_{INS}=10$ ГОм, $C1=100$ нФ, $U_{REF}=100$ В)

2.3 Выводы по Главе 2

При сравнении результатов моделирования с использованием Altium Designer с данными, полученными в результате экспериментов, можно сделать 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 конденсатора CI , 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 CI :

- 1) при $R_{EQ}=0.1$ ГОм, $CI=100$ нФ;
- 2) при $R_{EQ}=1$ ГОм, $CI=10$ нФ;
- 3) при $R_{EQ}=10$ ГОм, $CI=1$ нФ.

Экспериментально подтверждено, что ПСН с Т-образной обратной связью обладает до 3 раз лучшим быстродействием, чем ПСН с классической обратной связью [65].

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ПОМЕХ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Если в процессе измерения не приняты меры по экранированию преобразователя сопротивления в напряжения (ПСН) и/или контролируемого кабеля, то помехи частотой 50 Гц на выходе преобразователя сопротивления достигают такого уровня, при котором невозможно различить на их фоне полезный сигнал. Добавление в структуру ПСН интегратора и ФНЧ [9] позволяет значительно их ослабить, однако при этом по сигналу на выходе видно, что на процесс измерения сопротивления изоляции кабеля оказывают влияние помехи, вызванные движением оператора и расположенных вблизи предметов. Эти помехи носят несистемный характер и могут быть описаны как сигналы с частотой ниже 1 – 2 Гц. Влияние такого рода помех может быть уменьшено путем использования низкочастотной фильтрации выходного сигнала ПСН, но при этом значительно увеличивается время установления, которое ограничено требованиями [4].

Для борьбы с помехами, вызванными движением оператора и расположенных вблизи предметов, необходимо сначала понять каким образом возникает влияние оператора на сигнал ПСН. При этом необходимо выявить через какие составляющие электромагнитных полей (электрические или магнитные), помехи оказывают наибольшее воздействие, а также исследовать зависимость амплитуды помех от расстояния до преобразователя и исследуемого кабеля.

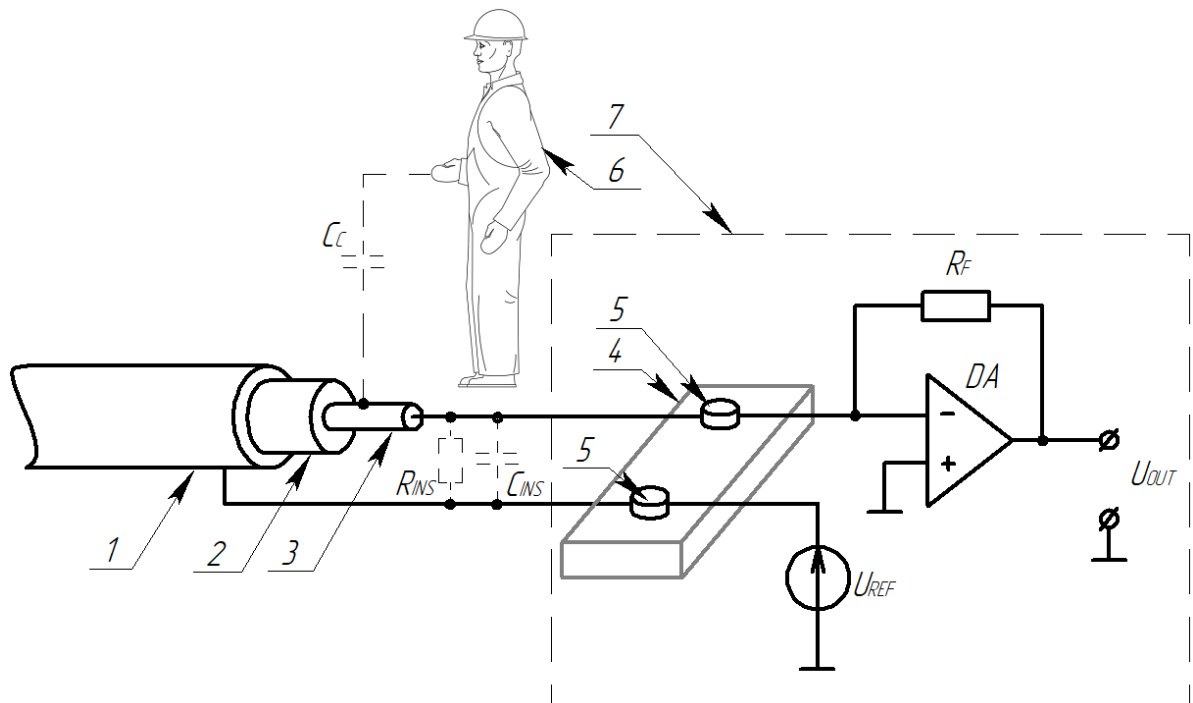
В данной главе описывается исследование влияния на сигналы ПСН низкочастотных помех, вызванных электростатическими зарядами, скапливающимися на поверхности предметов и людей, а также помех, вызванных воздействием постоянных и переменных магнитных полей. При этом отдельно исследовалось влияние помех непосредственно на ПСН и на испытуемый кабель, подключенный к преобразователю.

3.1 Исследование влияния электростатического заряда на ПСН

На рисунке 3.1 представлена предполагаемая модель, которая описывает механизм воздействия, вызванный движением электростатических зарядов. Ток помехи емкости связи оператора с ПСН и контролируемым кабелем равен:

$$I_n = C_c(t) \cdot \frac{dU_n}{dt} = \frac{dq_c}{dt}, \quad (3.1)$$

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



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 3.1 – Эквивалентная схема влияния оператора при контроле сопротивления изоляции кабеля

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 инвертирующем входе операционного усилителя 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 $1,5 \cdot 10^{17}$ Ом·см) [66], что позволило минимизировать токи утечки [67, 68]. В экспериментах сопротивление обратной связи подбиралось таким образом, чтобы выходное напряжение U_{OUT} на измеряемых пределах равнялось 1 В.

На рисунке 3.2 показан сигнал низкочастотной помехи на выходе ПСН, вызванный оператором, который «сел-встал» около контролируемого кабеля, на расстоянии 1 м.

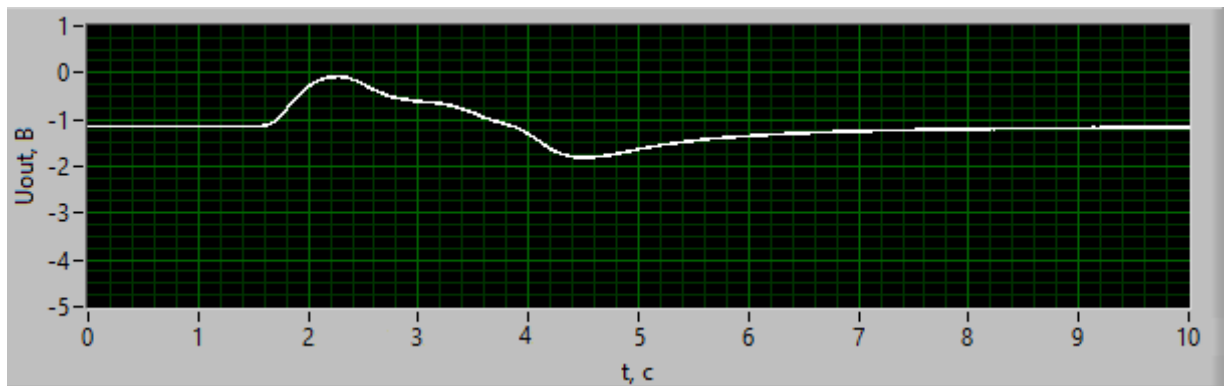
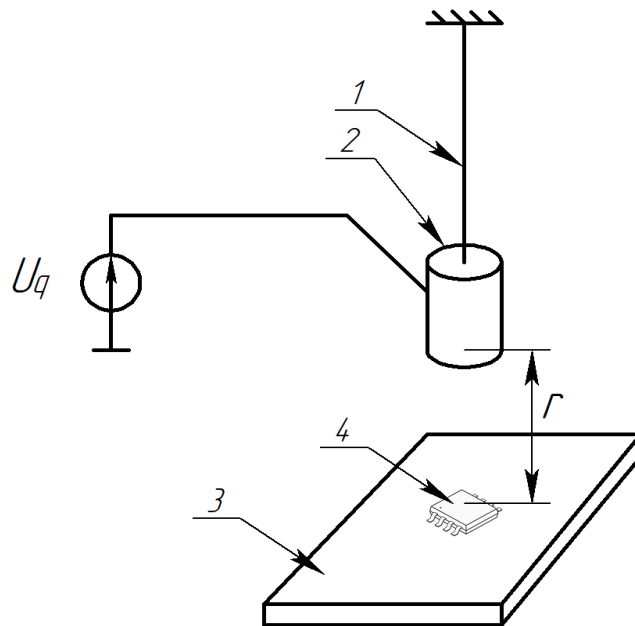


Рисунок 3.2 – Сигнал низкочастотной помехи на выходе ПСН ($R_{INS}=1000$ ГОм, $C_I=1$ нФ, $U_{REF}=100$ В, $R_I=100$ МОм, $R_2=100$ кОм, $R_3=1010$ Ом, $R_{EQ}=10$ ГОм), вызванный оператором

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 3.3 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 неперiodического 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 постоянного напряжения

Рисунок 3.3 – Схема экспериментальной установки

Источник постоянного напряжения имел диапазон выходного напряжения от 0 до 1000 В, во время эксперимента потенциал электрода задавался от 200 В до 1000 В с шагом 100 В. Основание электрода находилось на расстоянии r от инвертирующего входа операционного усилителя ПСН. 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 (Рисунок 3.4), что позволило объективно оценить воздействие искусственно созданной помехи (низкочастотное электрическое поле), так как внутри экранирующей камеры воздействие внешних помех минимизировано.



1 – контролируемый кабель; 2 – источник питания; 3 – ПСН

Рисунок 3.4 – Экранирующая камера

На рисунке 3.5 продемонстрирован сигнал низкочастотной помехи на выходе ПСН, вызванный кратковременным воздействием на электрод напряжением постоянного тока.

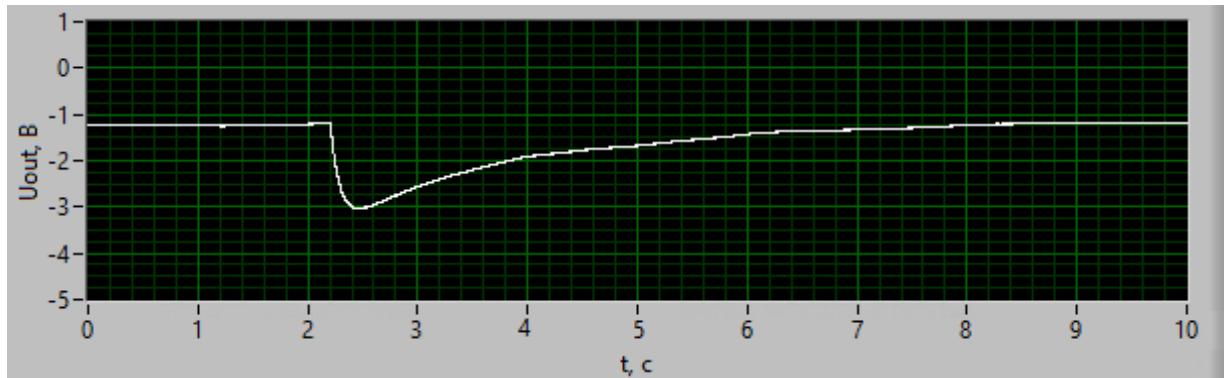
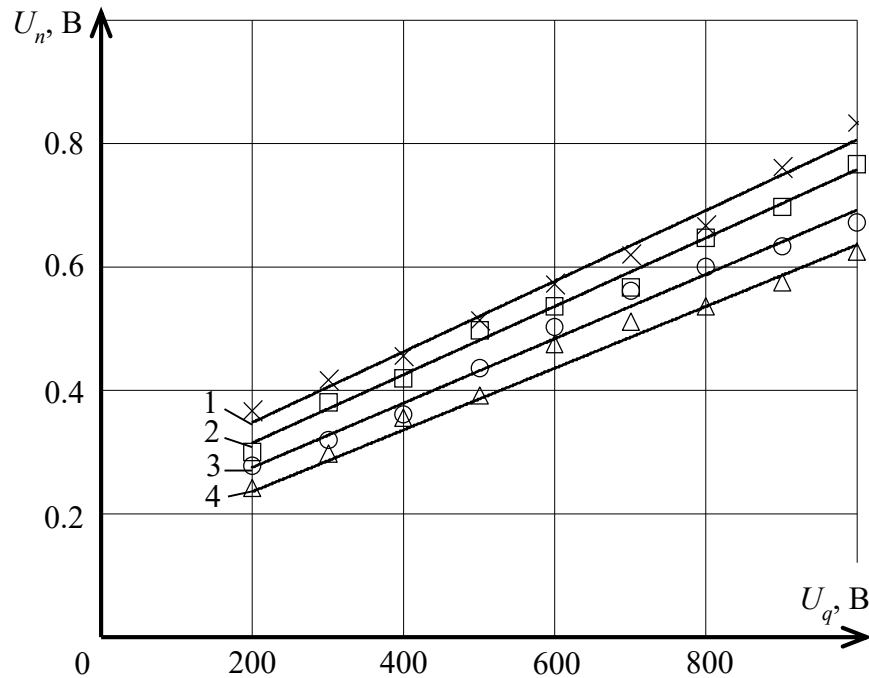


Рисунок 3.5 – Сигнал низкочастотной помехи на выходе ПСН, вызванный кратковременным воздействием на электрод постоянным напряжением ($R_{INS}=1000$ ГОм, $C_I=1$ нФ, $U_{REF}=100$ В, $R_I=100$ МОм, $R_2=100$ кОм, $R_3=1010$ Ом, $R_{EQ}=10$ ГОм, $U_q=1000$ В, $r=40$ мм)

В качестве ПСН использовалась схема с Т-образной обратной связью, обладающая более высокими метрологическими характеристиками, чем ПСН, представленный на рисунке 3.1 [55]. 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 $C_I=1$ нФ.

На рисунке 3.6 представлена зависимость амплитуды напряжения помехи U_n на выходе ПСН от потенциала заряженного электрода при различных фиксированных расстояниях r от преобразователя до основания электрода.



1 – $r = 30$ мм; 2 – $r = 40$ мм; 3 – $r = 50$ мм; 4 – $r = 60$ мм

Рисунок 3.6 – Экспериментальная зависимость амплитуды напряжения помехи U_n от потенциала заряженного электрода при различных фиксированных расстояниях r от ПСН до основания электрода

Согласно полученным результатам прослеживается линейная зависимость амплитуды напряжения помехи от величины заряда электрода. С увеличением расстояния r влияние искусственно созданной помехи уменьшается обратно пропорционально. При необходимости можно спрогнозировать значение амплитуды напряжения помехи для значений U_q более 1000 В по следующей формуле:

$$U_n = k \cdot U_q, \quad (3.3)$$

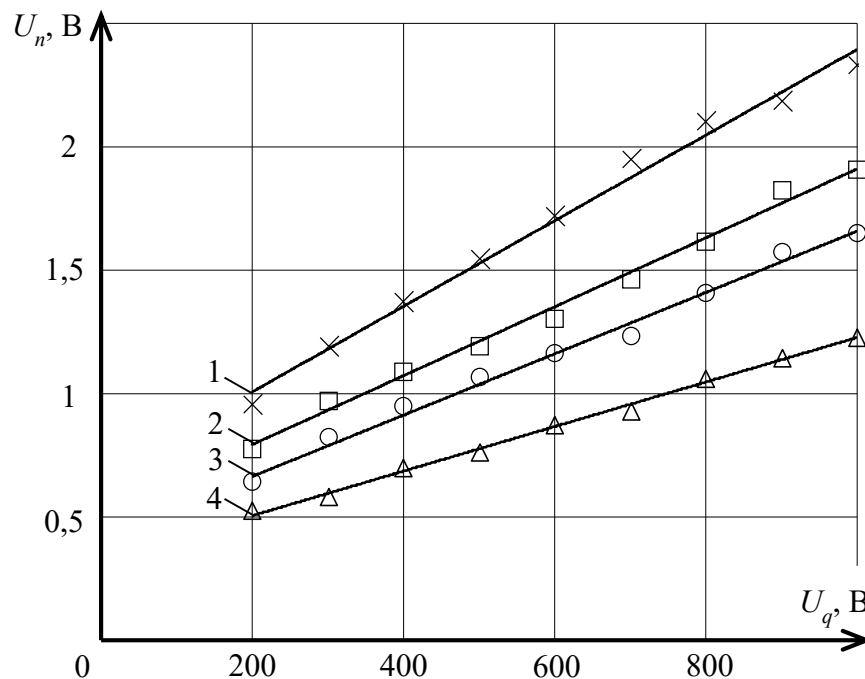
где k – угловой коэффициент прямой.

3.2 Исследование влияния электростатического заряда на ПСН с подключенным к нему кабелем

При контроле сопротивления изоляции кабельных изделий существует возможность экранировать ПСН и тем самым уменьшить влияние накапливаемых

на поверхности преобразователя и на теле человека, который производит контроль, электростатических зарядов на результат измерения. Но тогда возникает другая проблема: электростатический заряд накапливается также и на поверхности контролируемых кабельных изделий. И если короткий образец кабеля разместить в экранирующей камере не составит труда, то с большой бухтой кабеля возникнут сложности.

На рисунке 3.7 изображена зависимость амплитуды напряжения помехи U_n от потенциала заряженного электрода при различных расстояниях r от контролируемого кабеля до основания электрода. Нить подвеса электрода и центр окружности кабеля, свернутого в бухту, располагались на одной линии.

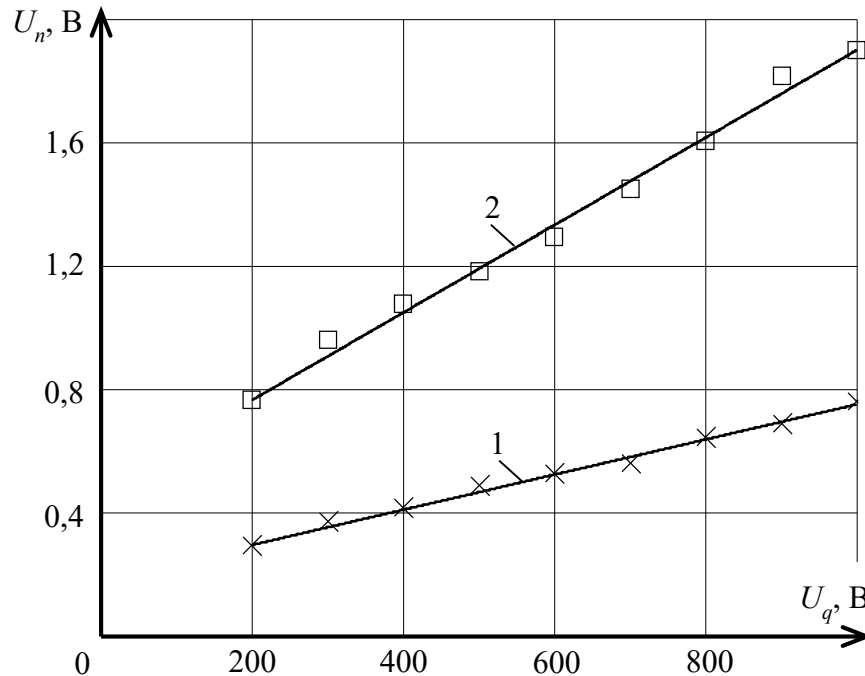


1 – $r = 30$ мм; 2 – $r = 40$ мм; 3 – $r = 50$ мм; 4 – $r = 60$ мм

Рисунок 3.7 – Экспериментальная зависимость амплитуды напряжения помехи U_n от потенциала заряженного электрода при различных фиксированных расстояниях r от контролируемого кабеля до основания электрода

Характер зависимости аналогичен зависимости изображенной на рисунке 3.6. Происходит линейное увеличение амплитуды напряжения помехи с увеличением потенциала заряда электрода.

При сравнении экспериментальных зависимостей амплитуды напряжения помехи от потенциала заряженного электрода видно, что электростатический заряд оказывают большее влияние при воздействии через кабель (Рисунок 3.8).



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

Рисунок 3.8 – Экспериментальная зависимость амплитуды напряжения помехи U_n от потенциала заряженного электрода при $r = 40$ мм

Проведенные эксперименты показывают, что без экранирования ПСН и без предусмотренной экранирующей камеры для контролируемого кабеля, на результаты измерений огромное влияние оказывает электростатический заряд, накапливаемый на поверхности ПСН, объекте контроля и на операторе, проводящем контроль. Влияние электростатического заряда на измерения происходит только при динамическом взаимодействии оператора с измерительным преобразователем и объектом контроля.

3.3 Исследование влияния магнитного поля на ПСН с подключенным к нему кабелем

Кроме влияния электрического поля на сигнал измерительного преобразователя было исследовано влияние магнитного поля. Однако неясно, насколько сильно данное воздействие? Для решения данного вопроса был взят постоянный магнит типа АМ01, магнитный поток Φ через полюса магнита которого составляет 60 мкВб и проверено его влияние на процесс измерения сопротивления при статическом положении и в динамике. Динамическое влияние было воспроизведено с помощью маятниковой системы, где в роли груза маятника использовался сам магнит. По результатам эксперимента выяснено, что магнитное поле постоянного магнита не оказывает влияние на процесс измерения сопротивления изоляции кабельных изделий.

Дальнейшим исследованием стала проверка влияния низкочастотного магнитного поля с большим магнитным потоком на измерение сопротивления изоляции кабельных изделий. Для данного эксперимента была изготовлена катушка индуктивности диаметром 0,2 м с количеством витков $N = 580$ из медного эмалированного провода диаметром 0,29 мм. Мощность генератора синусоидальных сигналов ограничена 1 Вт, амплитуда сигнала – до 10 В. Частота сигнала задавалась с шагом 0,1 Гц.

Так как экспериментальное исследование влияния электростатических зарядов показало, что амплитуда помехи прямо пропорциональна увеличению потенциала заряда, взаимодействующего с объектом контроля, то при исследовании влияния магнитного поля амплитуда напряжения генератора была выбрана всего 10 В для того, чтобы исключить влияние больших напряжений и объективно оценить воздействие магнитного потока на измерение сопротивления изоляции кабеля. Магнитный поток, создаваемый катушкой индуктивности, пропорционален силе тока:

$$\Phi = LI, \quad (3.4)$$

где L – индуктивность катушки, Гн; I – ток, пропускаемый по катушке индуктивности, А.

Измерение с помощью RLC -метра показало, что индуктивность катушки равна 150 мГн. Реактивной составляющей сопротивления катушки индуктивности на низких частотах можно пренебречь, так как активная составляющая равна 100 Ом. Пропускаемый по катушке индуктивности ток 350 мА. Из выражения (3.4) следует, что магнитный поток катушки 52 мВб. Это в 1000 раз больше магнитного потока, используемого в предыдущем эксперименте постоянного магнита. Потребляемая мощность катушки индуктивности 0,49 Вт. Следовательно, мощности генератора достаточно для подключения в нагрузку катушки индуктивности.

Частота сигнала при исследовании варьировалась в диапазоне от 0 до 100 Гц. При этом создать помеху воздействуя катушкой индуктивности на преобразователь сопротивления и кабель не удалось даже при расстоянии от катушки до преобразователя и кабеля 5 мм.

Созданное магнитное поле в разы превышало фоновое магнитное поле лаборатории, в которой проводилось исследование. Следовательно, ПСН достаточно защищен от данного вида помех.

3.4 Выводы по Главе 3

В данной главе показано исследование влияния низкочастотных помех при контроле сопротивления изоляционных материалов.

Стоит отметить, что во всех проведенных экспериментах в интеграторе измерительного преобразователя использовался конденсатор с минимальным значением емкости ($C_I=1$ нФ), что позволило не нарушить работоспособность преобразователя и, в свою очередь, максимально уменьшило помехозащищенность преобразователя. С увеличением емкости конденсатора в интеграторе, помехозащищенность преобразователя улучшается, но значительно увеличивается время установления измеренного сопротивления изоляции

кабельных изделий и может достигать нескольких часов, что является недопустимым.

Выяснено, что при динамическом воздействии электростатических зарядов на выходе ПСН помимо полезного сигнала появляется низкочастотный сигнал помехи. Данный сигнал помехи может увеличиваться при движении оператора или при низкой относительной влажности воздуха [34, 67].

В работе экспериментально определено, что амплитуда напряжения помехи увеличивается линейно при увеличении потенциала электростатического заряда. Также увеличение амплитуды напряжения помехи происходит при уменьшении расстояния между заряженным электродом и преобразователем сопротивления или объектом контроля [69].

Сравнительный анализ экспериментальных зависимостей амплитуды напряжения помехи от потенциала заряженного электрода при воздействии электрода на ПСН и кабель показывает, что влияние низкочастотных помех через кабель имеет более существенное значение [69].

Влияние магнитного поля неподвижного и движущегося постоянного магнита на процесс измерения сопротивления изоляционных материалов незначительно. Также никакого воздействия на процесс измерения не оказало низкочастотное электромагнитное поле с большим магнитным потоком [69].

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ В НАПРЯЖЕНИЕ ПРИ КОНТРОЛЕ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

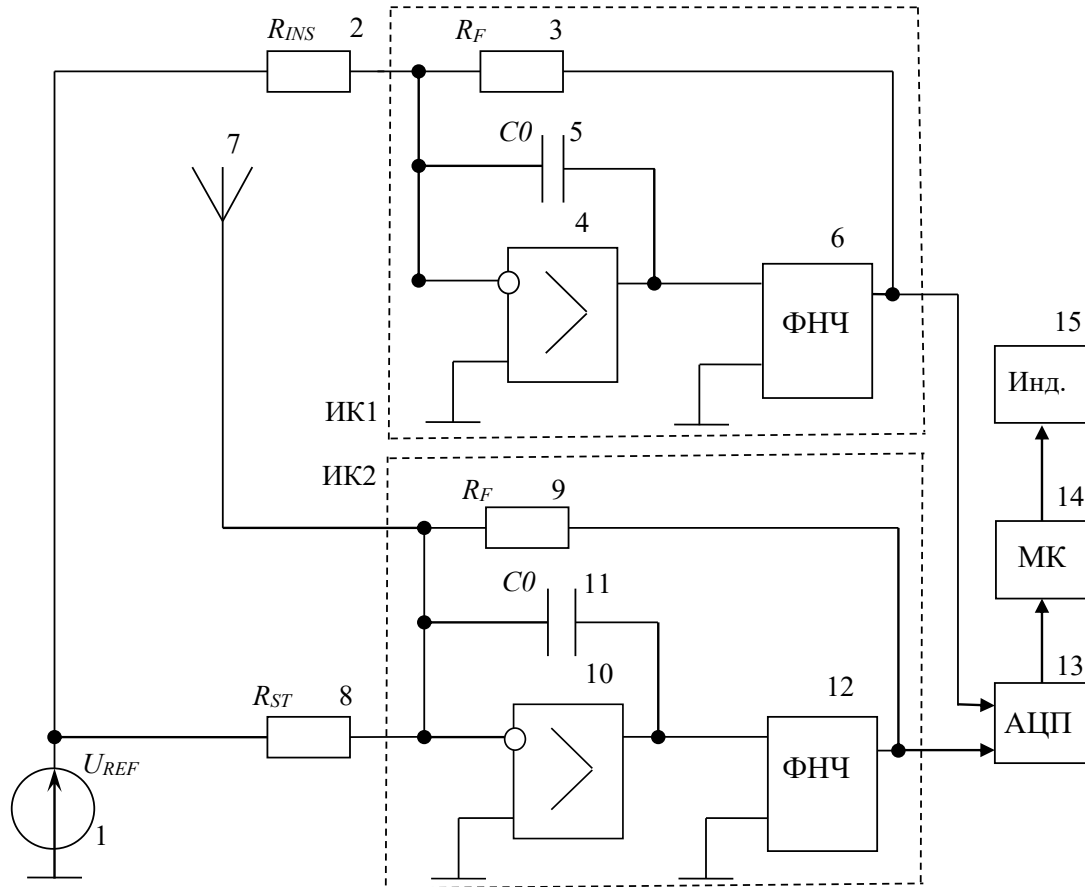
Из проведенного в Главе 1 обзора методов был сделан вывод, что лучшими техническими характеристиками при контроле сопротивления изоляции кабельных изделий обладает тераомметр на основе преобразователя сопротивлений с интегратором в первом каскаде. Основной недостаток данного тераомметра – плохая защищенность от низкочастотных помех.

Для устранения этого недостатка необходимо:

- схемотехнически доработать метод, чтобы в процессе измерения сопротивления происходило выделение низкочастотной помехи, как отдельного сигнала;
- разработать алгоритм, без применения фильтров, подавляющих низкочастотную составляющую, который позволит в режиме реального времени производить компенсацию помехи.

4.1 Дифференциальный метод с использованием двух измерительных каналов

В качестве схемы измерения использовался ПСН с интегратором в первом каскаде и Т-образной обратной связью (Рисунок 2.7). Это позволило обеспечить в разрабатываемом средстве контроля технические характеристики в соответствии с требованиями ГОСТ 3345-76. Для выделения сигнала низкочастотной помехи использовался второй измерительный канал, который улавливает сигнал низкочастотной помехи посредством антенны. Структурная схема устройства представлена на рисунке 4.1. Данное техническое решение защищено патентом [70].



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 4.1 – 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:

$$U_{INS} = -\frac{R_F}{R_{INS}} \cdot U_{REF}, \quad (4.1)$$

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

Выходной сигнал первого измерительного канала имеет следующий вид:

$$U_{CH1} = U_{INS} + U_{IF1} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_{IF} \cdot t + \varphi_{IF1}) + U_{LF1} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_{LF} \cdot t + \varphi_{LF1}), \quad (4.2)$$

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 7 представляет собой изолированный проводник длиной (1,5...2) м. Во время измерения антенна 7 должна находиться на контролируемом кабеле и повторять форму бухты кабеля.

Сигнал с антенны 7 поступает на вход ОУ 10 и содержит информацию о помехе. Значение эталонного сопротивления R_{ST} известно заранее.

Выходной сигнал второго измерительного канала имеет следующий вид:

$$U_{CH2} = U_{ST} + U_{IF2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_{IF} \cdot t + \varphi_{IF2}) + U_{LF2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_{LF} \cdot t + \varphi_{LF2}), \quad (4.3)$$

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 относительно 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:

$$U_{INS} = U_{CH1} - [U_{ST} + k_1 \cdot U_{IF2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_{IF} \cdot t + \varphi_{IF1} - \Delta\varphi_{IF}) + k_2 \cdot U_{LF2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_{LF} \cdot t + \varphi_{LF1} - \Delta\varphi_{LF})], \quad (4.4)$$

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.

4.2 Разработка алгоритмов адаптивной обработки сигналов

Для выполнения цифровой обработки сигналы U_{CH1} и U_{CH2} необходимо преобразовать с помощью АЦП.

Существует достаточно много вариантов обработки сигналов для компенсации помех.

4.2.1 Алгоритм с использованием минимальных и максимальных отклонений

На рисунке 4.2 представлен пример алгоритма адаптивной обработки сигнала, в котором значение коэффициента k_2 определяется по минимальным и максимальным значениям сигналов U_{CH1} и U_{CH2} . Данная схема алгоритма показывает пути прохождения и преобразования сигналов структурными блоками на языке близком к языку графического программирования LabView, т.е. стрелками показаны сигналы, а прямоугольниками – блоки преобразования [71].

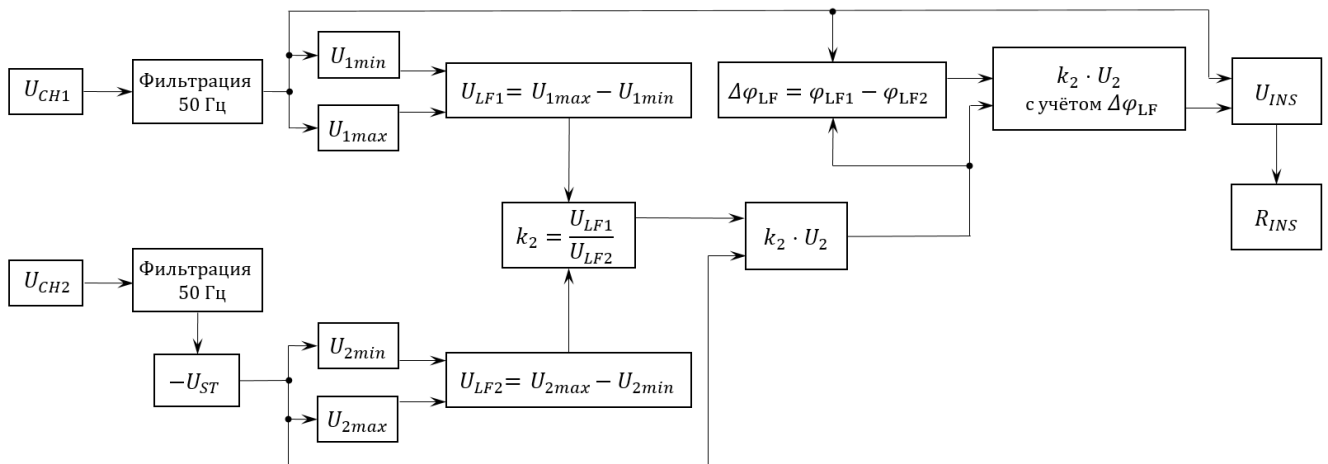


Рисунок 4.2 – Алгоритм адаптивной обработки сигнала с использованием минимальных и максимальных значений сигналов U_{CH1} , U_{CH2} для определения коэффициента k_2

Алгоритм работает следующим образом.

Выходные напряжения с первого и второго измерительных каналов фильтруются от помехи промышленной частоты $f_{IF} = 50$ Гц. Данная операция позволяет не определять коэффициент k_1 и фазовый сдвиг $\Delta\varphi_{IF}$, что существенно упрощает дальнейшую обработку сигналов.

Отфильтрованные от помех промышленной частоты сигналы U_1 , U_2 поступают на блоки, в которых происходит определение минимального и максимального значений. За исключением того, что во втором канале предварительно вычитается напряжение U_{ST} , которое падает на эталонном резисторе R_{ST} . Отношение разности максимального и минимального значения

сигнала U_1 , и разности максимального и минимального значения сигнала U_2 позволяет определить коэффициент k_2 .

Далее происходит умножение на коэффициент k_2 , отфильтрованного от помех промышленной частоты сигнала U_2 со второго измерительного канала.

Данный сигнал, а также отфильтрованный от помех промышленной частоты сигнал U_1 с первого измерительного канала поступают на блок, в котором определяется сдвиг фаз $\Delta\varphi_{LF} = \varphi_{LF1} - \varphi_{LF2}$.

С учетом сдвига фазы $\Delta\varphi_{LF}$ и коэффициента k_2 , по формуле (4.4), сигнал со второго измерительного вычитается из сигнала первого измерительного канала. В результате остается сигнал, зависящий только от напряжения U_{INS} . Далее из формулы (4.1) можно вычислить сопротивление изоляции кабеля R_{INS} .

$$R_{INS} = \left| \frac{R_F}{U_{INS}} \cdot U_{REF} \right|, \quad (4.5)$$

4.2.2 Алгоритм с использованием линейной аппроксимации

Аналогичным образом можно осуществлять адаптивную обработку сигналов с использованием вместо минимальных и максимальных отклонений от среднего значения сигнала линейную аппроксимацию для определения коэффициента k_2 .

На рисунке 4.3 показан пример такого алгоритма [71].

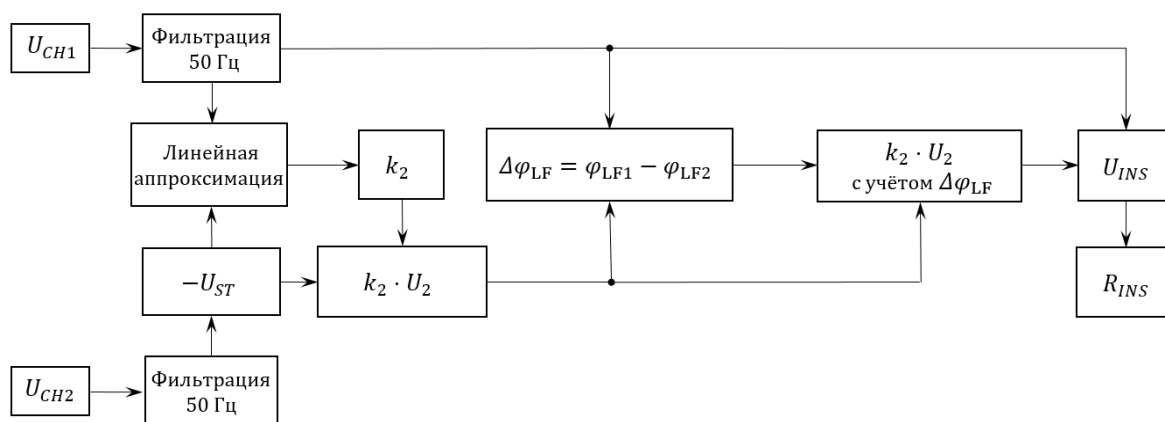


Рисунок 4.3 – Алгоритм адаптивной обработки сигнала с использованием линейной аппроксимации для определения коэффициента k_2

Как и в алгоритме, представленном на рисунке 4.2, выходные напряжения с первого и второго измерительных каналов фильтруются от помехи промышленной частоты 50 Гц. Далее сигналы поступают на блок линейной аппроксимации. На выходе блока определяется коэффициент k_2 . Следующая далее последовательность операций алгоритма обработки сигналов ничем не отличается от алгоритма, показанного на рисунке 4.2.

4.2.3 Классификация возможных алгоритмов адаптивной обработки сигналов для двухканальной схемы ПСН

У алгоритмов, изображенных на рисунке 4.2 и рисунке 4.3 существует возможность вариации интервала обработки сигнала и метода фильтрации помехи промышленной частоты. На рисунке 4.4 представлена классификация возможных алгоритмов адаптивной обработки сигналов для двухканальной схемы ПСН.

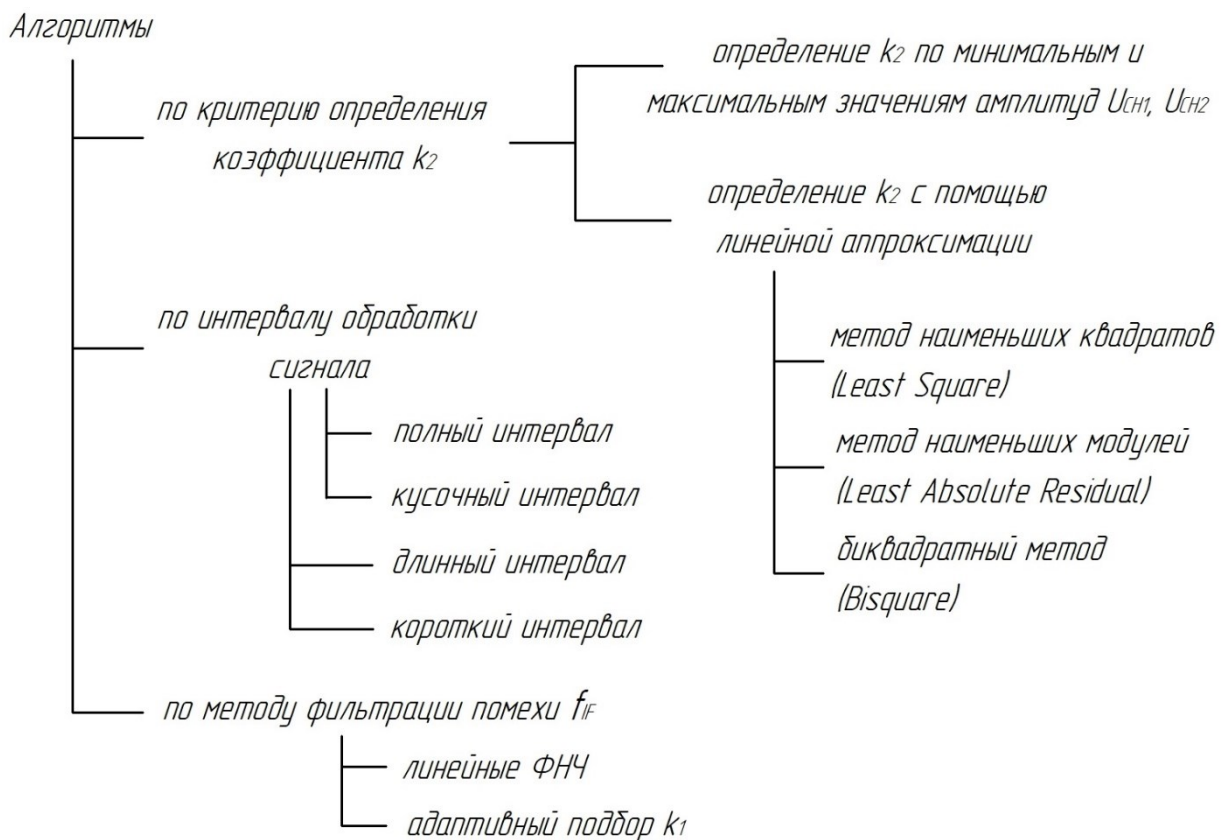


Рисунок 4.4 – Классификация алгоритмов адаптивной обработки сигнала для двухканальной схемы ПСН

От интервала обработки сигналов зависит быстродействие алгоритма и качество подавления помех. Следует выбирать интервал обработки сигнала не более (1...2,5) с, что обеспечивает своевременное обновление показаний измерений. Кроме того, определение параметров сигналов и компенсацию помех можно осуществлять, используя разбиение сигналов на короткие отрезки либо анализируя их во всем записанном в память интервале.

Для фильтрации помехи промышленной частоты возможно использование:

1) линейных ФНЧ (Баттерворта, Чебышева, Бесселя) с частотой среза менее 50 Гц;

2) вычитания сигнала U_{IF} помехи промышленной частоты по примеру вычитания сигнала U_{LF} помехи низкой частоты при адаптивном подборе коэффициента k_I и сдвига фаз $\Delta\phi_{IF}$.

Для алгоритма адаптивной обработки сигналов с использованием линейной аппроксимации при определении коэффициента k_2 возможно несколько вариаций метода линейной аппроксимации. Метод наименьших квадратов рекомендуется использовать при наличии в данных шумов с нормальным распределением, а метод наименьших модулей и биквадратный – при наличии выбросов данных [72].

Учитывая многообразие алгоритмов цифровой обработки сигналов и зависимость алгоритмов от различных характеристик преобразователя сопротивления в напряжение и АЦП, перечень вариантов алгоритмов, представленных на рисунке 4.4, можно дополнять по мере появления новых исследований.

4.3 Установка для исследования помехоустойчивости одноканальной и двухканальной схем ПСН

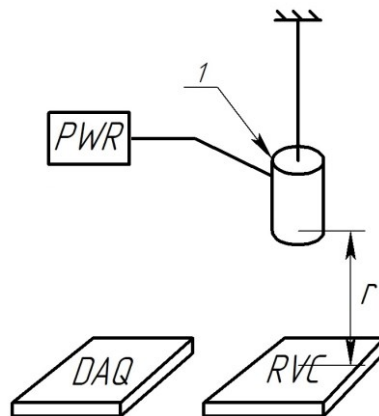
Для исследования помехоустойчивости двухканального ПСН при контроле сопротивления изоляции кабелей была собрана установка, с помощью которой

создавалась низкочастотная помеха (Рисунок 4.5). Установка состоит из следующих блоков:

- 1) источник напряжения постоянного тока до 1000 В;
- 2) электрод, в виде металлического цилиндра, на который подается постоянное напряжение. Электрод выполнен в форме цилиндра высотой $h=38$ мм и диаметром 14 мм.

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

Все исследования проводились в экранирующей камере. Сигнал низкочастотной помехи на выходе ПСН, создавался по аналогии с экспериментами, представленными в Главе 3.



1 – электрод; *PWR* – источник напряжения постоянного тока; *RVC* – преобразователь сопротивления в напряжение; *DAQ* – плата сбора данных NI USB-6002

Рисунок 4.5 – Схема заряда электрода

Схемотехника двухканального ПСН позволяет 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. По среднему значению сигнала в соответствии с выражением (4.5) определялось измеряемое сопротивление R_{INS} .

Цифровая обработка сигналов двухканальной схемы ПСН была реализована по двум алгоритмам: алгоритму с использованием минимальных и максимальных отклонений, представленному на рисунке 4.2 и алгоритму с использованием линейной аппроксимации, представленному на рисунке 4.3. Фильтрация помехи промышленной частоты производилась аналогично одноканальной схеме ПСН. Преобразователи сопротивления были реализованы по Т-образной схеме, приведенной на рисунке 2.7, в соответствии с выводами и рекомендациями, полученными в Главе 2.

Цифровая обработка сигнала производилась с помощью многофункционального устройства сбора данных NI USB-6002 [73]. Для обработки сигналов использовалась среда графического программирования LabView.

4.4 Экспериментальное исследование помехоустойчивости одноканальной и двухканальной схем ПСН

Для определения эффективности предложенной двухканальной схемы ПСН перед одноканальной, было проведено экспериментальное исследование помехоустойчивости преобразователей на искусственно созданную низкочастотную помеху.

Чтобы объективно сравнить помехоустойчивость преобразователей на всех исследуемых пределах измерения, имитация объекта контроля 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%.

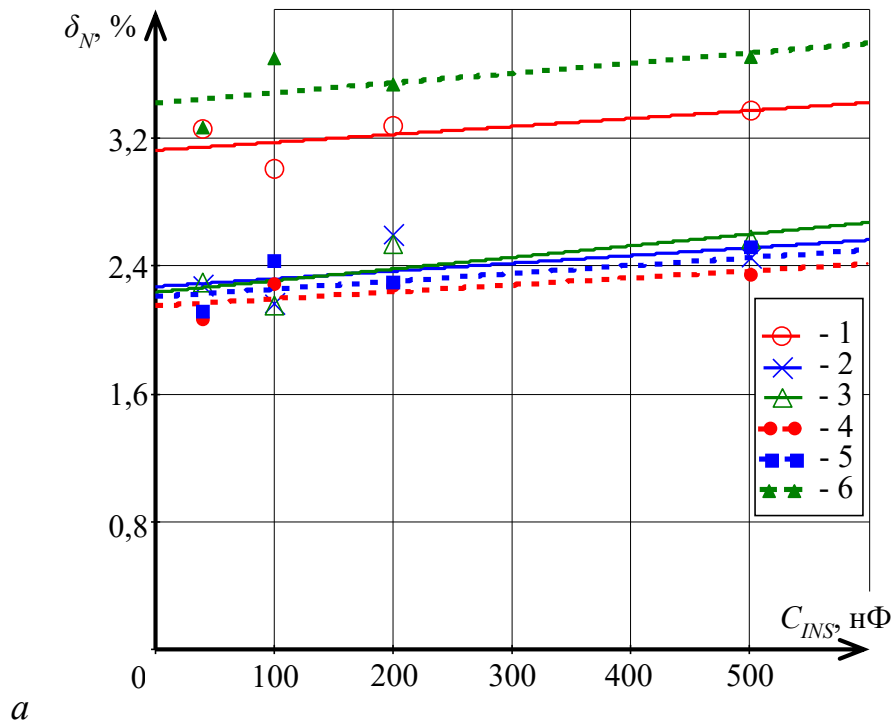
Исследовалась одноканальная схема ПСН, в которой фильтрация помехи низкой частоты производилась посредством усредняющего фильтра. В двухканальном ПСН фильтрация помехи низкой частоты была реализована:

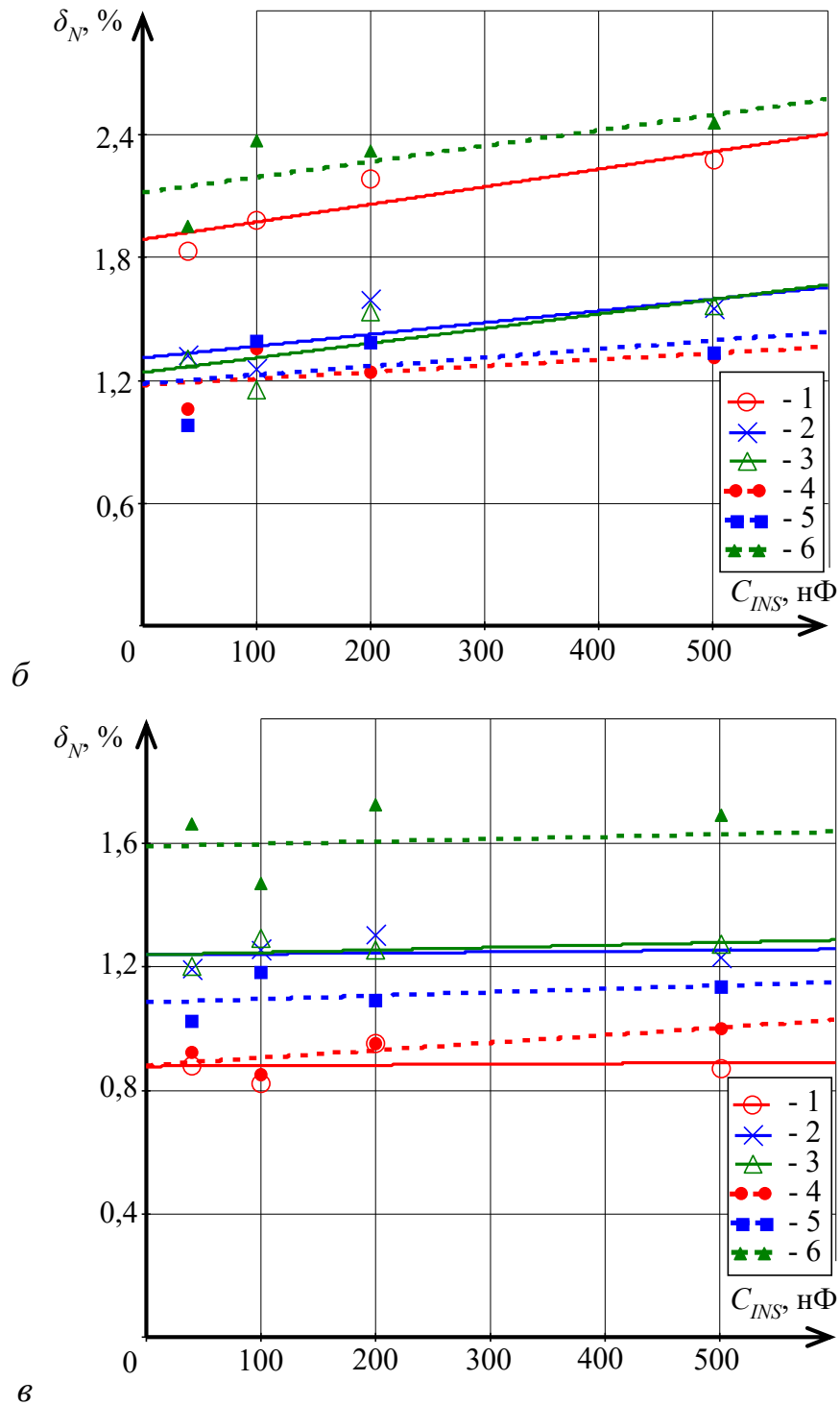
– адаптивной обработкой сигнала по минимальным и максимальным отклонениям (АОСММО);

– адаптивной обработкой сигнала с использованием линейной аппроксимации (АОСЛА).

Длительность записи сигнала во всех экспериментах была 10 с.

На рисунке 4.6 продемонстрированы экспериментальные зависимости погрешности измерения сопротивления изоляции от емкости при воздействии низкочастотного сигнала помехи на преобразователи, при $R_{INS} = 10$ ГОм и варьирующимся времени обработки сигнала T_{PR} .





1 – двухканальная схема ПСН без антенны с АОСММО; 2 – двухканальная схема ПСН без антенны с АОСЛА; 3 – одноканальная схема ПСН без антенны с применением ФНЧ; 4 – двухканальная схема ПСН с антенной с АОСММО; 5 – двухканальная схема ПСН с антенной с АОСЛА; 6 – одноканальная схема ПСН с антенной с применением ФНЧ

Рисунок 4.6 – Зависимость погрешности измерения сопротивления изоляции от емкости при воздействии низкочастотного сигнала помехи на ПСН с Т-образной обратной связью ($R1=1$ МОм, $R2=100$ кОм, $R3=1010$ Ом, $R_{EQ}=0,1$ ГОм, $R_{INS}=10$ ГОм, $CI=100$ нФ, $U_{REF}=100$ В): (а) $T_{PR}=1$ с; (б) $T_{PR}=2$ с; (в) $T_{PR}=2,5$ с

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

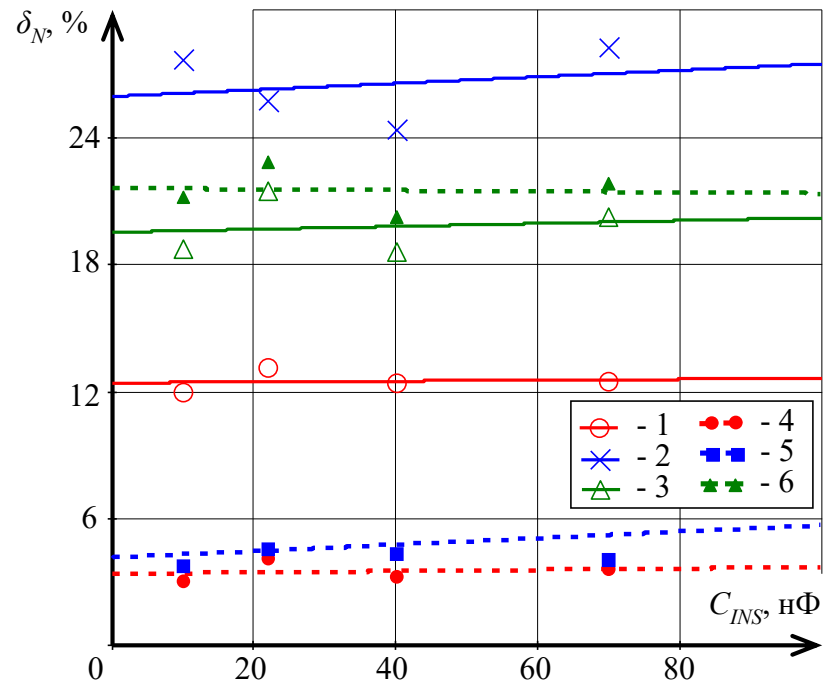
При измерении сопротивления $R_{INS}=10$ ГОм ПСН оказался относительно помехозащищенным: амплитуда помехи на выходе одноканального преобразователя не превышала 100 мВ (без антенны), а инерционность преобразователя на воздействие помехи была менее 1 с.

Наименьшая погрешность преобразователя (менее 1%) от воздействия низкочастотной помехи была получена у двухканального ПСН с применением алгоритма минимальных и максимальных отклонений, при $T_{PR}=2,5$ с. Причем, использование антенны у преобразователя оказалось необязательным фактором.

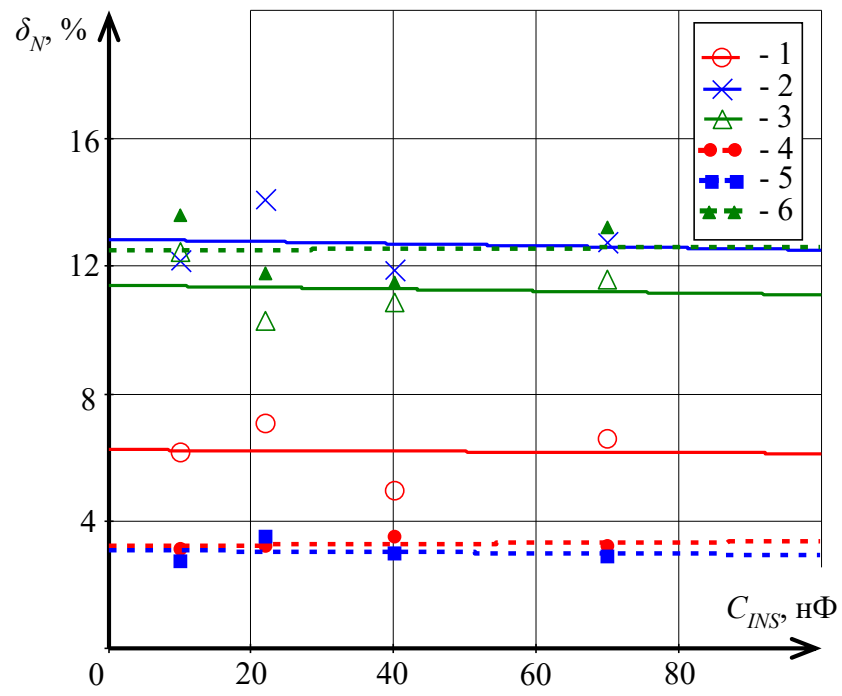
Изменение емкости объекта контроля незначительно влияет на погрешность преобразователя от воздействия низкочастотной помехи и может быть вызвано несовершенством воспроизведения искусственной помехи.

На рисунке 4.7 показаны экспериментальные зависимости погрешности измерения сопротивления изоляции от емкости при воздействии низкочастотного сигнала помехи на преобразователи, при $R_{INS} = 100$ ГОм и варьирующимся временем обработки сигнала T_{PR} .

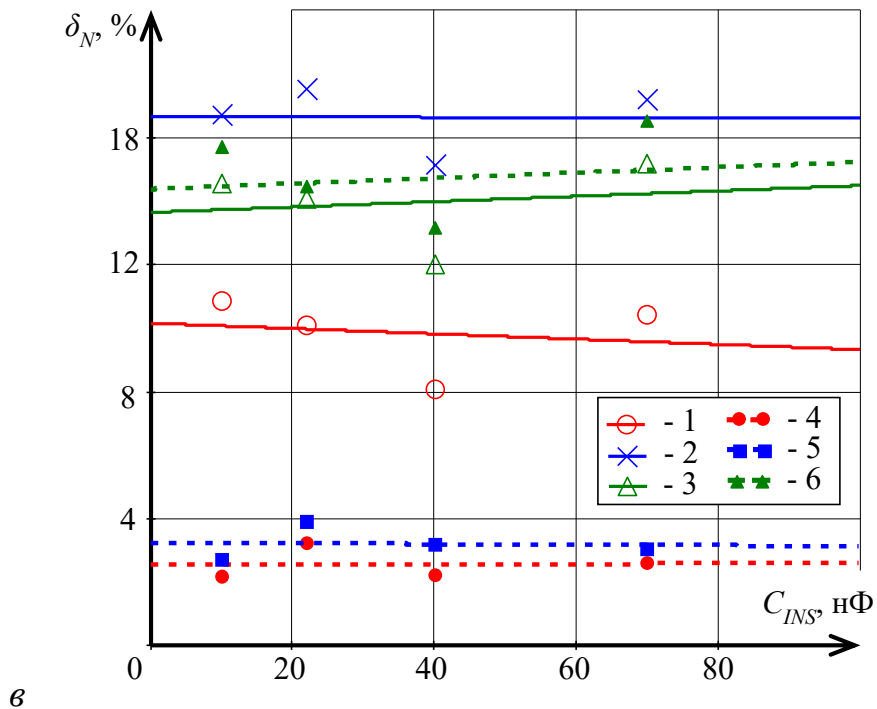
Амплитуда помехи на выходе одноканального преобразователя не превышала 500 мВ (без антенны), а инерционность преобразователя на воздействие помехи была менее 3 с, что соизмеримо с временем обработки сигнала. Несмотря на это, разработанные адаптивные алгоритмы справились с вычитанием помехи и двухканальный ПСН с антенной обеспечивает погрешность 3-4% от воздействия низкочастотной помехи. В свою очередь, одноканальный ПСН без антенны позволяет достичь погрешности 7-10%.



a



b



1 – двухканальная схема ПСН без антенны с АОСММО; 2 – двухканальная схема ПСН без антенны с АОСЛА; 3 – одноканальная схема ПСН без антенны с применением ФНЧ; 4 – двухканальная схема ПСН с антенной с АОСММО; 5 – двухканальная схема ПСН с антенной с АОСЛА; 6 – одноканальная схема ПСН с антенной с применением ФНЧ

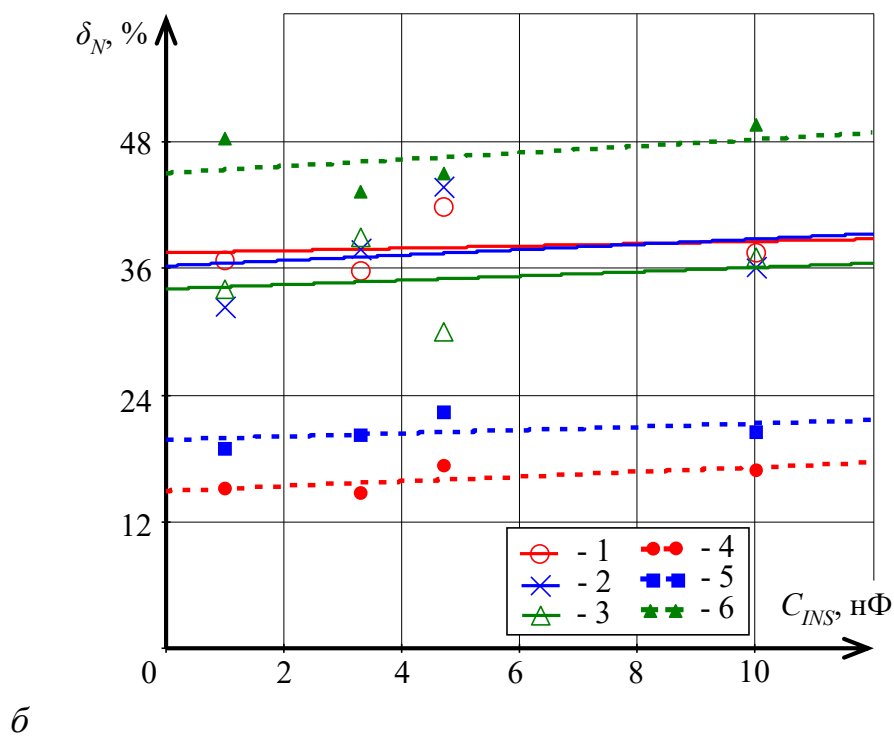
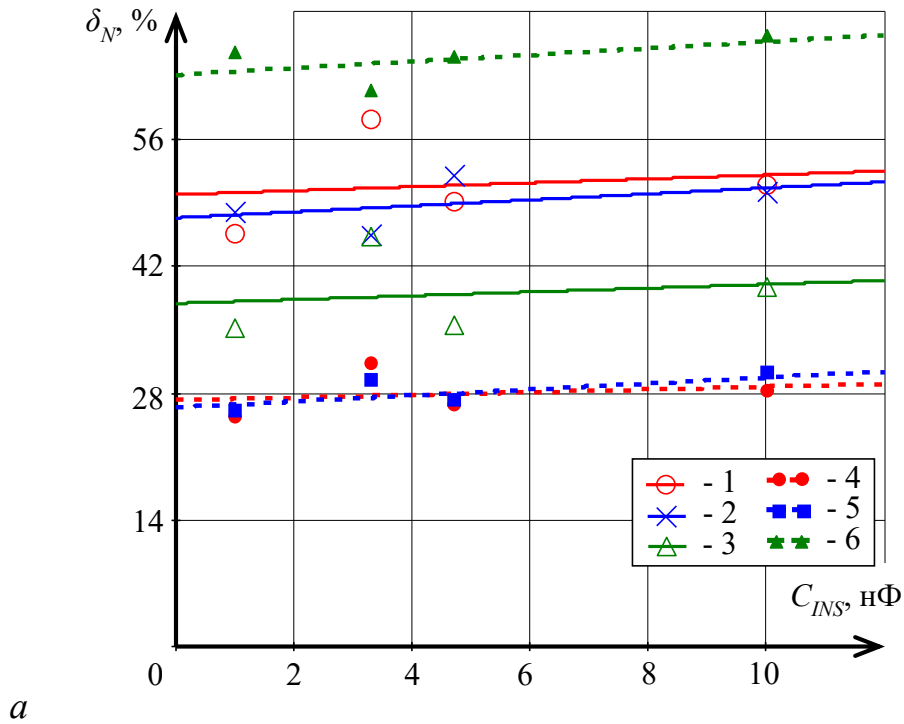
Рисунок 4.7 – Зависимость погрешности измерения сопротивления изоляции от емкости при воздействии низкочастотного сигнала помехи на ПСН с Т-образной обратной связью ($R1=10$ МОм, $R2=100$ кОм, $R3=1010$ Ом, $R_{EQ}=1$ ГОм, $R_{INS}=100$ ГОм, $C1=10$ нФ, $U_{REF}=100$ В): (а) $T_{PR}=1$ с; (б) $T_{PR}=2$ с; (в) $T_{PR}=2,5$ с

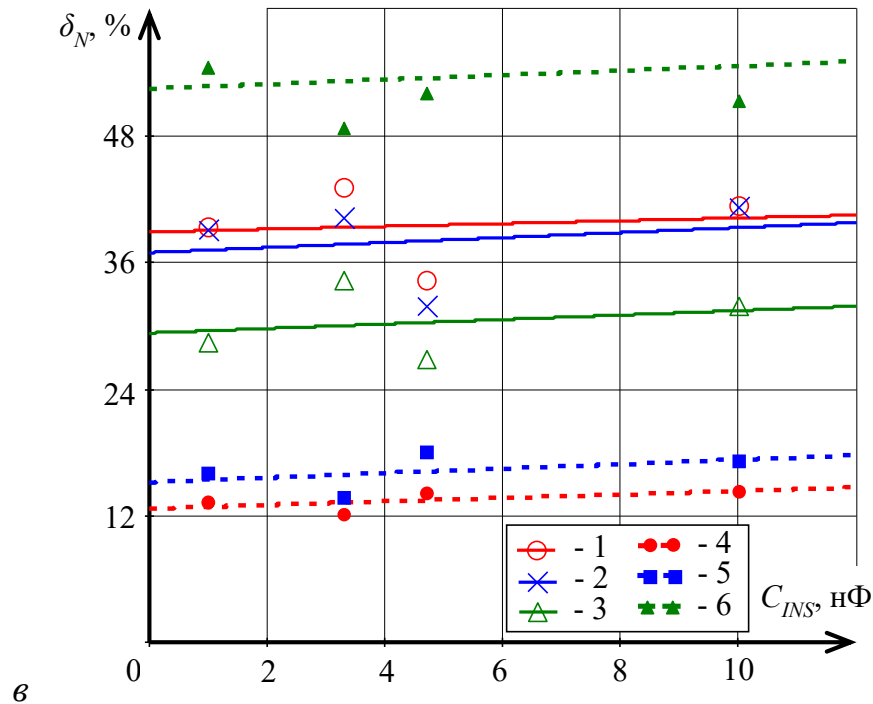
Увеличение погрешности при $R_{INS}=100$ ГОм по сравнению с результатами, полученными при $R_{INS}=10$ ГОм, вызвано длительностью воздействия помехи, которое соизмеримо с временем обработки. Поэтому адаптивные алгоритмы не успевают в полной мере сделать правильный подбор коэффициентов k_2 . В итоге сигнал помехи вычитается не полностью.

Стоит отметить, что не замечено увеличения погрешности измерения сопротивления изоляции от емкости при воздействии низкочастотного сигнала помехи на ПСН.

На рисунке 4.8 представлены экспериментальные зависимости погрешности измерения сопротивления изоляции от емкости при воздействии низкочастотного сигнала помехи на преобразователи, при $R_{INS}=1000$ ГОм и варьирующимся времени обработки сигнала T_{PR} .

Амплитуда помехи на выходе одноканального преобразователя не превышала 1,5 В (без антенны), а инерционность преобразователя на воздействие помехи была менее 3 с, как и на предыдущем рассматриваемом пределе измерения. Адаптивные алгоритмы вычитают помеху, но не полностью. Сказывается большая амплитуда помехи и, соизмеримая с длительностью обработки сигнала, инерционность преобразователя на воздействие помехи.





1 – двухканальная схема ПСН без антенны с АОСММО; 2 – двухканальная схема ПСН без антенны с АОСЛА; 3 – одноканальная схема ПСН без антенны с применением ФНЧ; 4 – двухканальная схема ПСН с антенной с АОСММО; 5 – двухканальная схема ПСН с антенной с АОСЛА; 6 – одноканальная схема ПСН с антенной с применением ФНЧ

Рисунок 4.8 – Зависимость погрешности измерения сопротивления изоляции от емкости при воздействии низкочастотного сигнала помехи на ПСН с Т-образной обратной связью ($R_1=100 \text{ МОм}$, $R_2=100 \text{ кОм}$, $R_3=1010 \text{ Ом}$, $R_{EQ}=10 \text{ ГОм}$, $R_{INS}=1000 \text{ ГОм}$, $C_I=1 \text{ нФ}$, $U_{REF}=100 \text{ В}$): (а) $T_{PR}=1 \text{ с}$; (б) $T_{PR}=2 \text{ с}$; (в) $T_{PR}=2,5 \text{ с}$

Значительно увеличилась погрешность преобразователя от воздействия низкочастотной помехи по сравнению с предыдущими пределами измерения. При $T_{PR}=1 \text{ с}$, ни одноканальный, ни двухканальный ПСН не справились с измерением, так как погрешность оказалась более 28%, а, согласно требованиям [4] при $R_{INS}=1000 \text{ ГОм}$ погрешность не должна превышать 20%.

При увеличении времени обработки сигнала двухканальный ПСН (с антенной) с предложенными адаптивными алгоритмами позволяет достичь погрешности от воздействия низкочастотной помехи не более 15%. В то время как одноканальный ПСН (без антенны) имеет погрешность более 30%, что не удовлетворяет требованиям ГОСТ 3345-76.

4.5 Выводы по Главе 4

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%).

ГЛАВА 5. МАКЕТ ТЕРАОММЕТРА Т-01 И ЕГО МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

5.1 Назначение

Макет тераомметра Т-01 (далее тераомметр Т-01) предназначен для измерения сопротивления резисторов, изоляционных материалов и изоляции кабелей.

Рабочие условия применения тераомметра:

- температура окружающей среды (5...35) °С;
- относительная влажность до 80% при температуре 25 °С;
- атмосферное давление (650...800) мм рт.ст.;
- параметры питающей сети: номинальное напряжение 220 В ± 10 %, частота тока 50 Гц.

5.2 Технические характеристики

Основные технические характеристики обеспечиваются прибором Т-01:

- диапазон измеряемых значений сопротивления ($10^5 \dots 10^{13}$) Ом;
- измерительное напряжение постоянного тока 100 В ± 10 %;
- время установления показаний сопротивления резисторов с ручным выбором пределов не более 5 с;
- время установления показаний сопротивления резисторов с автоматическим выбором пределов не более 15 с;
- время установления показаний сопротивления изоляции кабеля ($R_{INS}=1$ ТОм, $C_{INS}=4,7$ нФ) с автоматическим выбором пределов не более 60 с;
- время обновления показаний 2 с;
- значения относительной погрешности приведены в таблице 5.1;

Таблица 5.1 – Относительная погрешность тераомметра Т-01

Предел измерения, Ом	Относительная погрешность измерения, %
10^5	0,2
10^6	0,2
10^7	0,2
10^8	0,2
10^9	1
10^{10}	1
10^{11}	5
10^{12}	10
10^{13}	10

– мощность, потребляемая прибором при номинальном напряжении питающей сети, не более 20 Вт;

– габаритные размеры прибора не более 300х300х150 мм;

– масса прибора не более 3 кг.

Указанные выше технические характеристики тераомметра Т-01 были определены в результате испытаний прибора комиссией с участием специалистов НПО «Редвилл» (Приложение Б).

В таблице 5.2 показано сравнение основных характеристик промышленных тераомметров с тераомметром Т-01.

Таблица 5.2 – Основные характеристики тераомметров

Название тераомметра	Fluke 1555FC	Sonel MIC-10k1	Hioki IR3455	Т-01
Диапазон измеряемых значений сопротивления	от 200 кОм до 2 ТОм	до 20 ТОм	до 10 ТОм	от 100 кОм до 10 ТОм
Максимальный предел измерения сопротивления при измерительном напряжении 100 В	50 ГОм (при 250 В)	400 ГОм	500 ГОм (при 250 В)	10 ТОм
Измерительное напряжение, В	от 250 до 10000	до 10000	от 250 до 10000	100

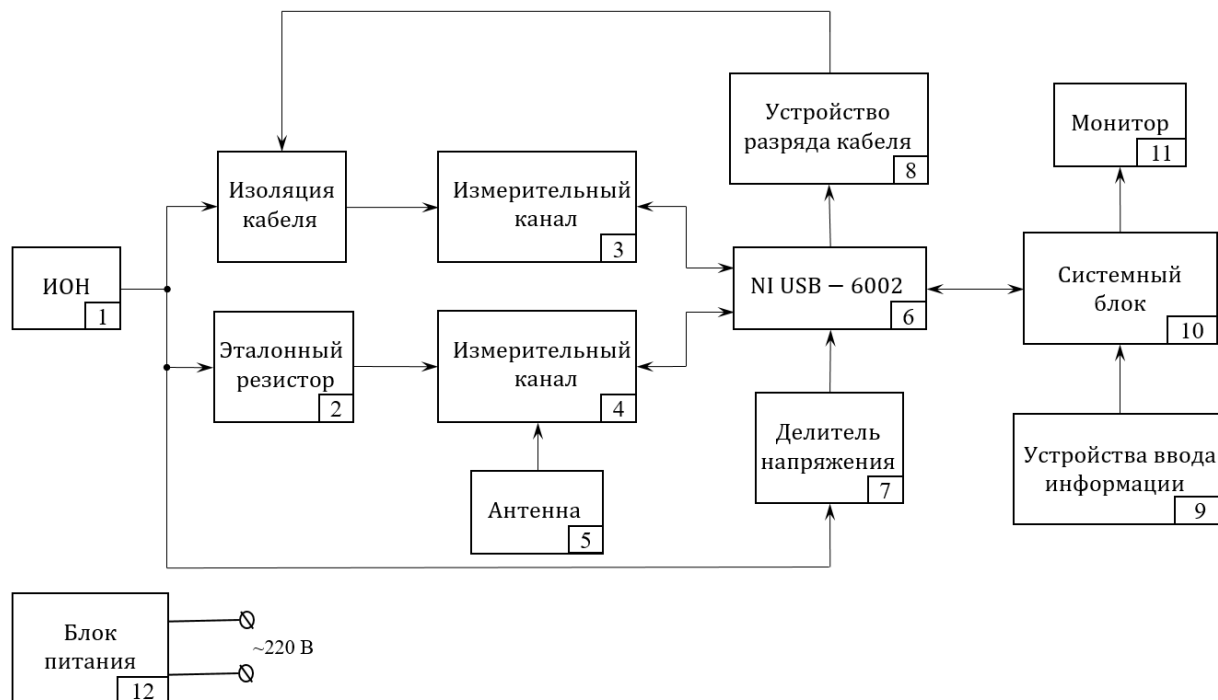
Продолжение таблицы 5.2.

Погрешность, %	20%	12,5%	30 %	10
Время установления показаний сопротивления, с	-	-	-	60

В документации промышленных тераомметров, которые применяются для контроля сопротивления изоляции кабельных изделий время измерения не указывается. Но у прибора Fluke 1555FC имеется характеристика: скорость заряда емкостной нагрузки, которая составляет 5 с/мкФ.

5.3 Устройство прибора

Структурная схема тераомметра Т-01 приведена рисунке 5.1. Прибор состоит из 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 5.1 – Структурная схема тераомметра Т-01

Напряжение от блока питания 12 подается на источник опорного напряжения 1, на котором формируется напряжение постоянного тока. Полученное напряжение поступает на контролируемый кабель, эталонный резистор 2 и на делитель напряжения 7. Измерительный канал 3 регистрирует падение напряжения на контролируемом кабеле, а измерительный канал 4 – на эталонном резисторе 2. С помощью антенны 5 измерительный канал 4 получает сигнал помехи качественно близкий сигналу помехи на выходе измерительного канала 3. Многофункциональное устройство сбора данных 6 считывает показания с измерительных каналов 3 и 4. Далее, посредством алгоритма с использованием минимальных и максимальных отклонений (раздел 4.2.1) оно производит выделение полезного сигнала измеряемого сопротивления изоляции кабеля. Алгоритм реализован в среде графического программирования LabView.

Делитель напряжения 7 уменьшает амплитуду источника опорного напряжения 1 до необходимого для устройства сбора данных 6 уровня. Далее по формуле (4.5) устройство сбора данных 6 преобразует значение измеренного сопротивления изоляции кабеля. Управление и вычисление прибором, а также отображение результатов измерения осуществляется с помощью персонального компьютера, который в свою очередь состоит из устройств ввода 9, системного блока 10 и монитора 11. Устройство разряда кабеля 8 срабатывает автоматически до и после измерения.

Блок питания и аналоговая часть тераомметра Т-01 расположены в основном блоке устройства. Лицевая панель основного блока устройства показана на рисунке 5.2.



Relay – разъем управления реле; ADC – разъем с аналоговыми выходными сигналами измеряемого сопротивления; Antenna – разъем для подключения антенны; Rx+ – положительная клемма; Rx- – отрицательная клемма

Рисунок 5.2 – Лицевая панель основного блока тераомметра Т-01

Разъемы «Relay» и «ADC» используются для соединения с устройством NI USB-6002. Разъем «Antenna» необходим для подключения антенны к прибору. Клеммы «Rx+» и «Rx-» используются для подключения соединительных кабелей с зажимами типа «крокодил».

5.4 «Рабочая» настройка прибора

Показания тераомметра чувствительны к температуре и влажности окружающей среды. Поэтому при изменении микроклимата помещения, в котором проводится измерение сопротивления изоляции кабеля, необходимо провести корректировку погрешности прибора. Для этого используются высокоточные резисторы известного номинала в диапазоне ($10^6 \dots 10^{12}$) Ом (Рисунок 5.3).

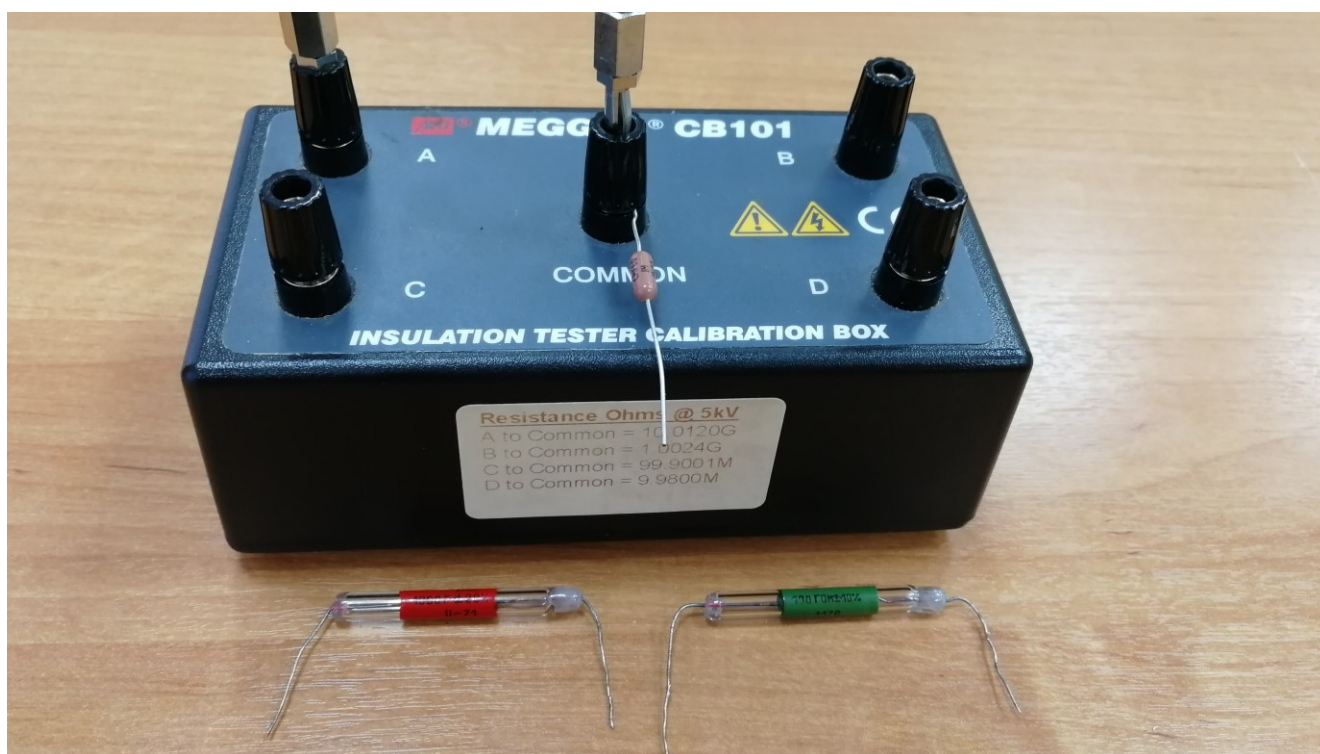


Рисунок 5.3 – Высокоточные резисторы

В таблице 5.3 приведены характеристики высокоточных резисторов.

Таблица 5.3 – Характеристики высокоточных резисторов

Номинальное значение сопротивления резистора, Ом	Допускаемое отклонение от номинального сопротивления, %	Рабочее напряжение, В
10^6	0,1	750
10^7	2	5000
10^8	2	5000
10^9	2	5000
10^{10}	2	5000
10^{11}	10	100
10^{12}	20	100

Тераомметр подключается к сети электропитания и включается тумблер, установленный на задней панели прибора.

Далее на персональном компьютере запускается программа «HR-meter_v1_calibr.vi» для проведения рабочей настройки прибора (Рисунок 5.4).

С помощью измерительных кабелей к клеммам «Rx+» и «Rx-» поочередно подключаются высокоточные резисторы. Подключив резистор к клеммам, на лицевой панели программы выбирается необходимое сопротивление обратной связи тераомметра «R0e».

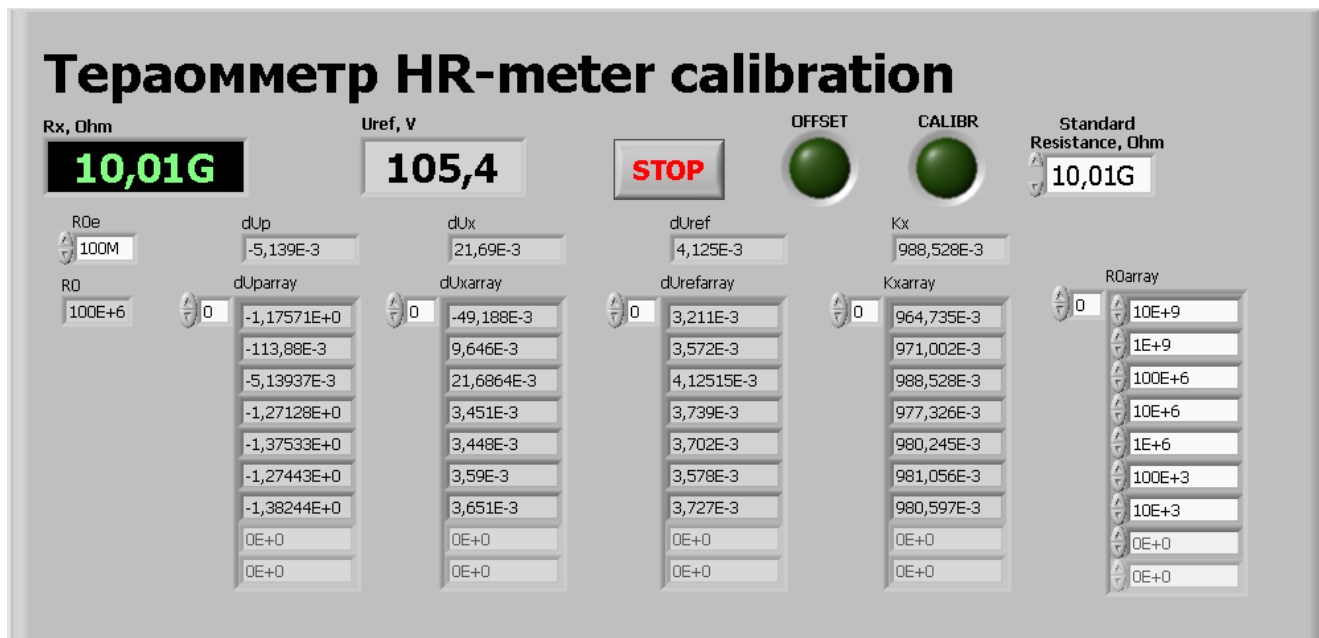


Рисунок 5.4 – Лицевая панель программы «рабочей» настройки тераомметра Т-01

При «рабочей» настройке полезный сигнал выходного напряжения прибора составляет 1 В и высокоточным резисторам соответствуют определенные значения сопротивлений обратной связи «R0e» (Таблица 5.4).

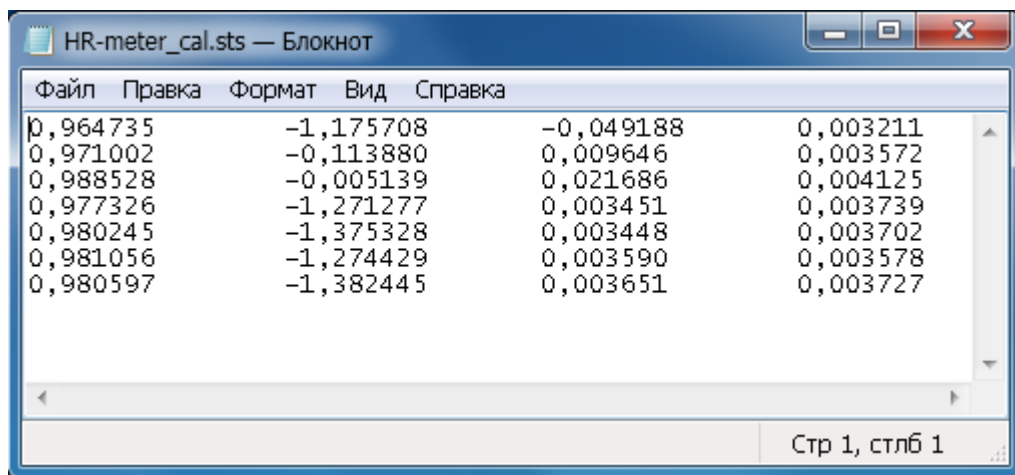
Таблица 5.4 – Соответствие значений высокоточных сопротивлений значениям сопротивлений обратной связи «R0e»

Значение высокоточного сопротивления, Ом	10^6	10^7	10^8	10^9	10^{10}	10^{11}	10^{12}
Значение сопротивления обратной связи «R0e», Ом	10^4	10^5	10^6	10^7	10^8	10^9	10^{10}

Далее производится запуск программы и после установления значения измеряемого сопротивления нажимается кнопка «OFFSET», что позволяет осуществить балансировку выходных измерительных каналов и источника

напряжения на выбранном пределе. В окно «Standard Resistance» вводится значение высокоточного резистора и нажимается кнопка «CALIBR». Полученные данные «рабочей» настройки автоматически записываются в файл HR-meter_cal.sts (Рисунок 5.5).

Данные процедуры проводятся на каждом измерительном пределе.



Файл	Правка	Формат	Вид	Справка
0,964735	-1,175708	-0,049188	0,003211	
0,971002	-0,113880	0,009646	0,003572	
0,988528	-0,005139	0,021686	0,004125	
0,977326	-1,271277	0,003451	0,003739	
0,980245	-1,375328	0,003448	0,003702	
0,981056	-1,274429	0,003590	0,003578	
0,980597	-1,382445	0,003651	0,003727	

Стр 1, стлб 1

Рисунок 5.5 – Файл с данными калибровки тераомметра Т-01

Далее можно приступать к измерению сопротивления изоляции кабелей. Для кабелей с сопротивлением изоляции более 2 ГОм в прибор подключается антенна. Конструкция и расположение антенны относительно объекта контроля описаны в разделе 4.1.

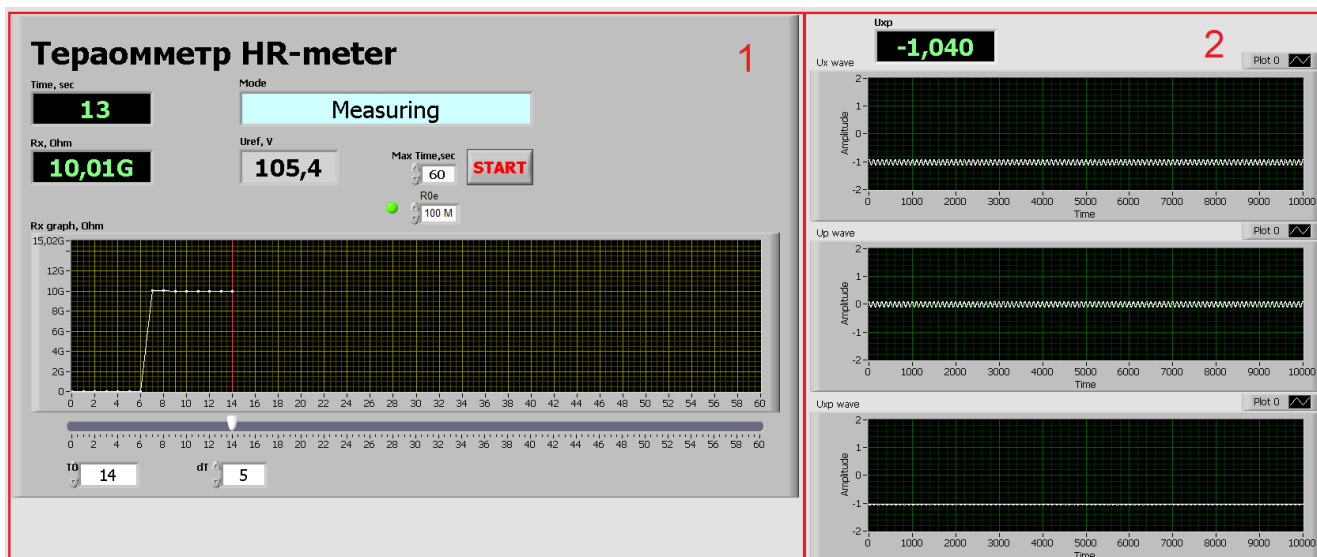
5.5 Режимы измерения

В тераомметре Т-01 предусмотрено два режима измерения:

- с ручным выбором пределов измерения;
- с автоматическим выбором пределов измерения.

5.5.1 Ручной выбор пределов измерения

После запуска, программа HR-meter_manual.vi считывает файл с данными «рабочей» настройки и тераомметр готов к выполнению измерений. Лицевая панель программы измерения тераомметра Т-01 показана на рисунке 5.6.



1 – левая часть панели; 2 – правая часть панели

Рисунок 5.6 – Лицевая панель программы измерения тераомметра Т-01

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

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 $R(t)$.

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.

Перед измерением и после его окончания в приборе происходит автоматический разряд кабеля. После разряда кабеля отображение показаний

прибора начинается через 3 с. Это необходимо, чтобы исключить недостоверные показания сопротивления, вызванные инерционностью прибора после разряда кабеля. Далее тераомметр переходит в режим измерения. На лицевой панели программы отображается соответствующий режим работы прибора (Рисунок 5.7).

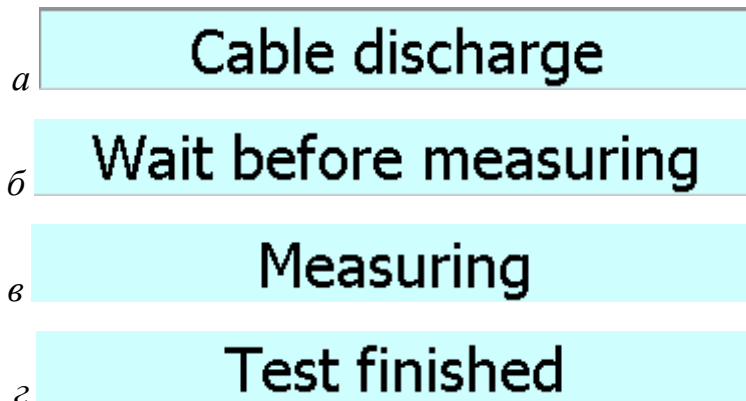


Рисунок 5.7 – Режимы работы прибора: разряд кабеля (а), ожидание перед измерением (б), измерение (в), завершение контроля (г)

После измерения предоставляется возможность для анализа построенного графика $R(t)$ (Рисунок 5.8). С помощью ползунка, который находится под графиком, можно выбрать временной участок, на котором рассчитывается среднее значение сопротивления изоляции и отобразится на индикаторе «Rx». Переключателем «T0» также есть возможность выставить расположение курсора. Переключатель «dT» позволяет задать ширину расположения курсоров.

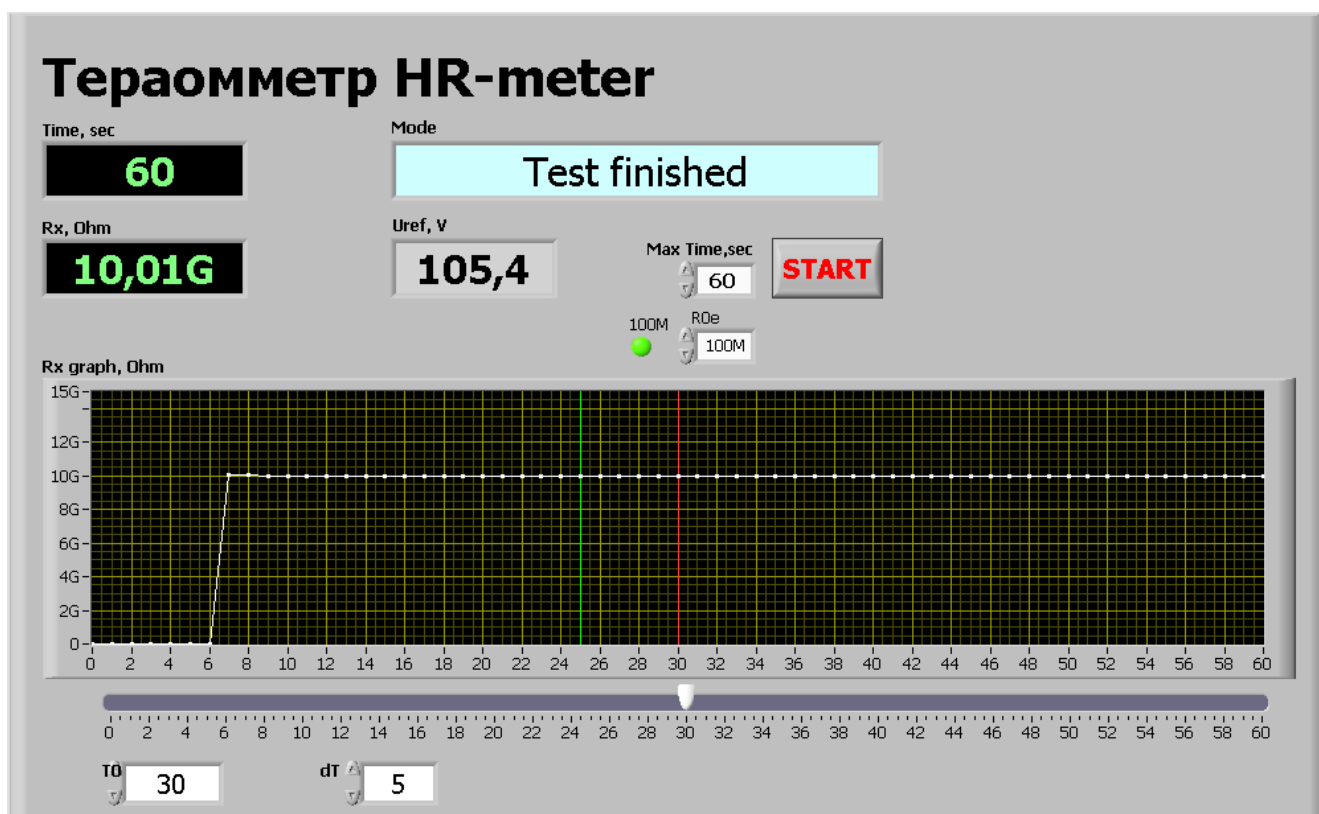


Рисунок 5.8 – Основная часть лицевой панели программы с ручным выбором пределов после завершения измерения

5.5.2 Автоматический выбор пределов измерения

Программа с автоматическим выбором пределов измерения HR-meter_v1.vi обладает таким же интерфейсом и функционалом, что и программа с ручным выбором пределов, за исключением того, что предел подбирается автоматически (Рисунок 5.9).

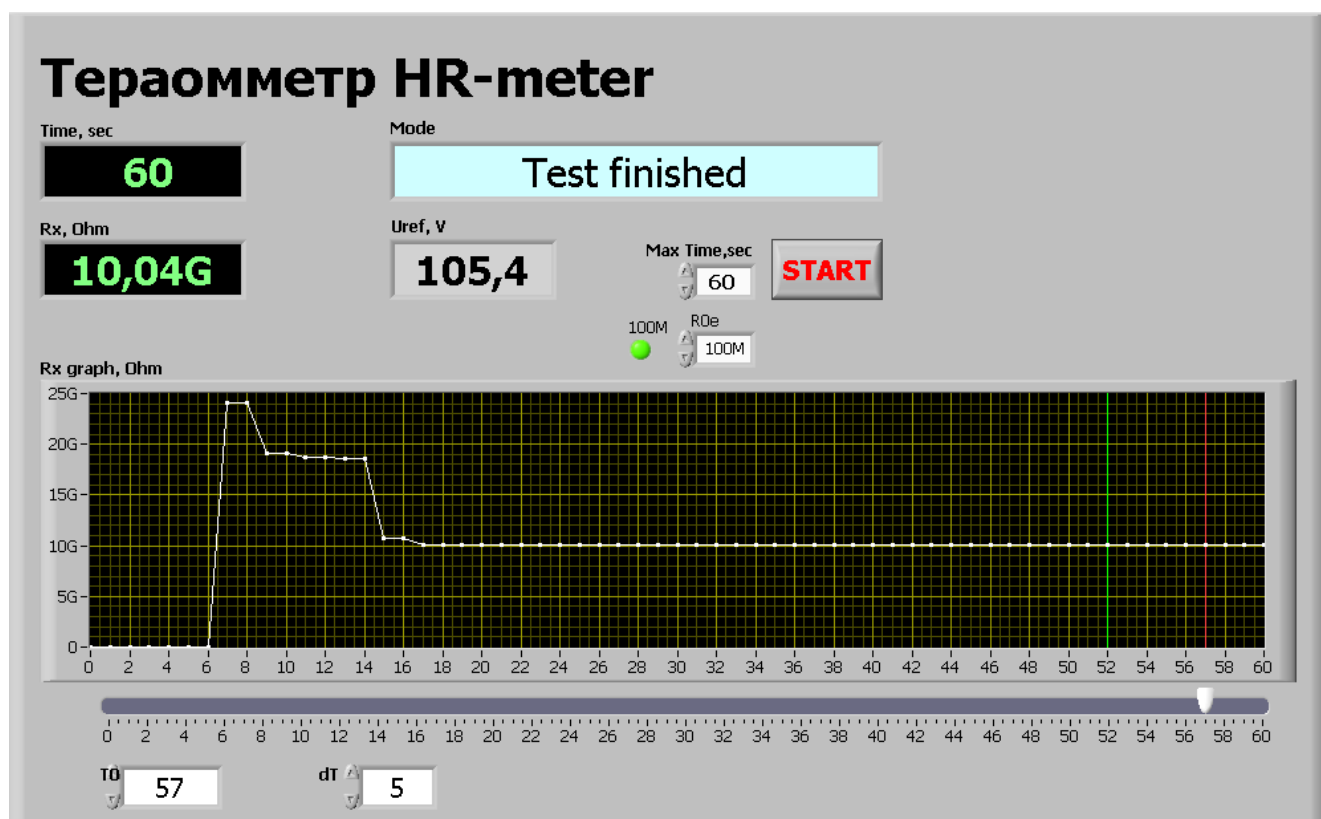


Рисунок 5.9 – Основная часть лицевой панели программы с автоматическим выбором пределов после завершения измерения

5.6 Выводы по главе 5

1. Приведены технические характеристики, устройство и комплектация прибора Т-01. Указанные технические характеристики были определены на испытаниях прибора комиссией с участием специалистов НПО «Редвилл».
2. Для проведения «рабочей» настройки тераомметра Т-01 используются высокоточные резисторы.
3. Предложена процедура «рабочей» настройки, которая позволяет провести корректировку тераомметра Т-01 с целью исключения мультипликативной и аддитивной составляющих погрешностей измерения при контроле сопротивления изоляции.
4. Реализованы программы с ручным и автоматическим выбором пределов измерения сопротивления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 ($10^5 \dots 10^{13}$) Ом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Леонов, В.М. Основы кабельной техники: учебник для студентов высших учебных заведений / В.М. Леонов, И.Б. Пешков, И.Б. Рязанов, С.Д. Холодный; под ред. И.Б. Пешкова. – М.: Академия, 2006. – 432 с.
2. Городецкий С.С. Испытания кабелей и проводов: учебное пособие для техникумов / С.С. Городецкий, Р.М. Лакерник. – Москва: Энергия, 1971. – 272 с.: ил.
3. Холодный, С.Д. Методы испытаний и диагностики в электроизоляционной и кабельной технике: учебное пособие / С.Д. Холодный, С.В. Серебрянников, М.А. Боев. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – 232 с.
4. ГОСТ 3345-76. Кабели, провода, шнуры. Метод определения электрического сопротивления изоляции [Электронный ресурс]. – Введ. 1978-01-01. – с измен. 1989.01.01 – Режим доступа: URL: <https://www.internet-law.ru/gosts/gost/40818/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 01.12.2017).
5. 6517B Electrometer/High Resistance Meter Datasheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://www.testequipmenthq.com/datasheets/KEITHLEY-6517B-Datasheet.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ. (дата обращения 11.02.2018).
6. Digital super megohmmeter DSM-8104, DSM-8542 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://www.hioki.cn/product/pdf/DSM-8104E5-11E.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ. (дата обращения 17.02.2018).
7. Тераомметр ТОММ-01 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://printsip.ru/izmeriteli-soprotivleniya-ommetry-mikroommetry/item/tomm-01>, свободный. Загл. с экрана. – Яз. англ. (дата обращения 17.02.2018).
8. Бородянский, И.М. Исследование и разработка быстродействующих методов измерения сопротивления утечки изоляции в электрических цепях под напряжением: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.13.05 / Бородянский Илья Михайлович. – Таганрог, 2006 – 16 с.

9. Якимов, Е. В. Исследование, разработка и применение методов защиты от помех преобразователей больших сопротивлений, применяемых при контроле изоляции кабельных изделий: дис. ... канд. тех. наук: 05.11.13 / Якимов Евгений Валерьевич – Томск, 2003. – 142 с.

10. Лачин, В.И. Методы и устройства контроля состояния электроэнергетических объектов с дискретно-распределенными параметрами: Монография / В.И. Лачин, К.Ю. Соломенцев. – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2012. – 342 с.

11. Соломенцев, К.Ю. Методы и устройства контроля сопротивления изоляции и емкости для систем управления электроэнергетическими объектами: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.13.05 / Соломенцев Кирилл Юрьевич – Новочеркасск, 2009 – 20 с.

12. А. с. 330402 СССР, МКИ G 01R 27/00. Устройство для измерения сопротивления изоляции и постоянной времени конденсатора [Текст] / С.Л. Эпштейн. – № 1605470/18-10; заявл. 22.12.1970; опубл. 22.11.1972, Бюл. №8. – 2 с.: ил.

13. Ансо, М.Х. Помехоустойчивый тераомметр. / М.Х. Ансо // Приборы и техника эксперимента. – 1983. – №4. – С.158-160.

14. Moore, G.F. Electric Cables Handbook / G.F. Moore – 3rd ed. – Bristol, UK: BICC Cables Ltd., 2006. – p. 1098.

15. Балашов, А.И. Кабели и провода. Основы кабельной техники / А.И. Балашов, М.А. Боев, А.С. Воронцов и др; под ред. И.Б. Пешкова. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – 467 с.: ил.

16. Белоруссов, Н.И. Электрические кабели, провода и шнуры: Справочник / Н.И. Белоруссов, А.Е. Саакян, А.И. Яковлева; под ред. Н.И. Белоруссова. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 536 с.: ил.

17. Неразрушающий контроль: Справочник / под ред. В.В. Клюева: в 7 томах. Т.5: в 2-х кн./ Кн. 2: Электрический контроль / К.В. Подмастерьев и др. – М.: Машиностроение, 2004. 679 с.: ил.

18. ГОСТ 22483-2012. Жилы токопроводящие для кабелей, проводов и шнуров [Электронный ресурс]. – Введ. 2014-01-01. – Режим доступа: URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/53063/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 08.10.2019).

19. Технический справочник: кабели, провода и материалы для кабельной индустрии. – Научно-производственное предприятие НКП «Эллипс», 2006. – 360 с.

20. Изделия кабельные. Информационно-технический сборник: В 7 т. / под общ. ред. А.И. Балашова. – М.: ОАО ВНИИ КП, 2004.

21. Белоруссов, Н.И. Электрические кабели и провода и шнуры (Теоретические основы кабелей и проводов, их расчет конструкции) / Н.И. Белоруссов. – М.: Энергия, 1971. – 512 с.

22. RG6/U Coaxial Cable [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://www.telesenner.com/otherfile/ziRaV4VMon13914.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. Яз. англ. (дата обращения 06.12.2020).

23. The Complete Guide to Electrical Insulation Testing. – UK: Megger Group Limited, 2006. – 67 p.

24. Introduction to Resistance Measurement. – Japan, Nagano: Hioki E.E. Corporation, 2005. – 20 p.

25. Insulation resistance testing. – USA, Everett: Fluke Corporation, 2003. – 8 p.

26. Окадзаки, К. Технология керамических диэлектриков / К. Окадзаки; перевод с японского М.М. Богачихина, Л.Р. Зайонца. – М.: Энергия, 1976. – 336 с.

27. Эпштейн, С.Л. Измерение характеристик конденсаторов. / С.Л. Эпштейн. – 2-е изд., доп. и перераб. – Л.: Энергия, 1971. – 220 с.

28. Электрические измерения. Средства и методы измерений (общий курс) / К.П. Дьяченко и др.; под ред. Е.Г. Шрамкова. – М.: Высшая школа, 1972. – 520 с.

29. Sawhney, A.K. A course in Electrical and Electronic Measurements and Instrumentation – Nai Sarak: Dhanpat rai & sons, 1985. – 1075 p.

30. Hossain, M.A. Electrical Measurement & Instrumentations: lecture. – Bangladesh, 2010 – 22 p.

31. Измерения в электронике: справочник. / Под ред. В.А. Кузнецова. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 512 с.
32. Раннев, Г.Г. Методы и средства измерений: учебник для вузов / Г.Г. Раннев, А.П. Тарасенко. – 2-е изд., стереотип. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 336 с.
33. Миронов, Э.Г. Методы и средства измерений: учебное пособие / Э.Г. Миронов. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2009. – 463 с.
34. Илюкович, А.М. Техника электрометрии. / А.М. Илюкович. – М.: Энергия, 1976. – 400 с.
35. Malaric, R. Instrumentation and Measurement in Electrical Engineering. / R. Malaric – New York: BrownWalker Press, 2011. – 253 p.
36. Дивин, А.Г. Методы и средства измерений, испытаний и контроля: учебное пособие. В 5 ч. / А.Г. Дивин, С.В. Пономарев, Г.В. Мозгова – Тамбов: Издательство ГОУ ВПО ТГТУ, 2011. – Ч. 1. – 104 с.
37. Грибанов, Ю.И. Измерение слабых токов, зарядов и больших сопротивлений / Ю.И. Грибанов. – М.- Л.: Гозэнергоиздат, 1962. – 80 с.
38. Rietveld, G. Automated High-Ohmic Resistance Bridge With Voltage and Current Null Detection / G. Rietveld, J. Van der Beek // IEEE transaction on instrumentation measurement. – 2012. – Vol. 62. – №6. – P. 1760-1765.
39. Jarrett, D. G. Automated guarded bridge for calibration of multimegohm standard resistors from 10 MOhm to 1 TOhm / D. G. Jarret // IEEE transaction on instrumentation measurement. – 1997. – Vol. 46. – №.2 – P. 325-328.
40. Рефлектометр цифровой РЕЙС-205 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://reis.narod.ru/files/pdf/reis205.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 15.02.2019).
41. Honig, R. Practical Aspects of High Resistance Measurement / R. Honig // Measurements International January – March 2010, Europe – 2010 – P. 19-25.
42. Tumanski, S. Principles of Electrical Measurement / S. Tumanski – New York, London: Taylor & Francis, 2006. – 472 p.

43. Попов, В.С. Электрические измерения: учебник для техникумов / В.С. Попов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1974. – 400 с.

44. MIC-10k1 Измеритель параметров электроизоляции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://www.sonel.ru/ru/products/insulation-resistance/detail.php?id4=559>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 19.03.2019).

45. High voltage insulation tester IR3455 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: https://www.hioki.com/en/products/detail/?product_key=6399, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ. (дата обращения 19.03.2019).

46. Тестер сопротивления изоляции 10 кВ Fluke Connect 1555 FC [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://www.fluke.com/ru-ru/product/electrical-testing/insulation-testers/fluke-1555>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 20.03.2019).

47. Нгуен, К.У. Быстродействующие устройства контроля и измерения сопротивления изоляции для систем управления электроэнергетическими объектами: дис. ... канд. тех. наук: 05.13.05 / Нгуен Куок Уи – Новочеркасск, 2015. – 230 с.

48. Гутников, В.С. Фильтрация измерительных сигналов / В.С. Гутников. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 192 с.

49. Гутников, В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах / В.С. Гутников. – 2-е изд. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 304 с.

50. Ultralow Input Bias Current Operational Amplifier AD549 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD549.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ. (дата обращения 10.09.2020).

51. Femtoampere Input Bias Current Electrometer Amplifier ADA4530-1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADA4530-1.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ. (дата обращения 10.09.2020).

52. LTC6268/LTC6269 500 MHz Ultra-Low Bias Current FET Input Op Amp [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/62689f.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ. (дата обращения 10.09.2020).

53. Difet Electrometer-Grade operational amplifier OPA128 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://edg.uchicago.edu/~tang/SNFactory/opa128.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ. (дата обращения 10.09.2020).

54. Попов, В.П. Основы теории цепей [Текст] / В.П. Попов. – 6-е изд. – М.: Высшая школа, 2007. – 575 с.

55. Yermoshin, N. Feasibility of using T-shaped feedback in teraohmmeters / N. Yermoshin, E. Yakimov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018. – V.289. – p. 1-7.

56. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник для бакалавров / Л.А. Бессонов. – 12-е изд., исправ. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2014. – 701 с.

57. Якимов, Е.В., Жуков В.К. Помехоустойчивость тераомметров на основе измерителей тока. / Е.В. Якимов, В.К. Жуков // Измерительная техника. – 2003. – №4. – С. 35-39.

58. Selection Table for UL/CSA Cables & Wires. – Hemmingen, Germany: Helukabel GmbH, 2015. – 511 p.

59. Cables, Wires & Accessories. – Hemmingen, Germany: Helukabel GmbH, 2015. – 76 p.

60. Cable Catalogue. – Warszawa, Poland: Technokabel, 2017. – 634 p.

61. Wilkens, W.D. Wire and Cable Technical Information Handbook / W.D. Wilkens. – 3rd ed. – Glenview, IL, USA: Anixter Inc., 1996. – 338 p.

62. Wire and Cable Products and Solutions [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://www.te.com/usa-en/products/wire-cable.html>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ. (дата обращения 07.07.2020).

63. Резисторы постоянные непроволочные КВМ, КИМ, КЛМ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://www.quartz1.com/price/PIC/480Q0717900.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 28.07.2020).

64. Конденсаторы полистирольные металлизированные однослойные К71-7 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://imgs.elgrad.net/Upload/sub-3/19641.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 28.07.2020).

65. 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.

66. ГОСТ 10007-80. Фторопласт-4. Технические условия [Электронный ресурс]. – Введ. 1978-07-01. – с измен. 1990.10.01 – Режим доступа: URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200020654>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 11.10.2020).

67. Вершина, Г.А. Исследование накопления заряда статического электричества на поверхности изделий из фторопласта-4 методом вибрирующего конденсатора / Г.А. Вершина, А.Л. Жарин, А.К. Тявловский // Наука и техника, 2012. – №1. – с. 26–32.

68. Ghajar, M. Effects of static electricity and fabrication parameters on PVDF film properties / M. Ghajar, M. Mashhadi, M. Irannejad et al. // Bulletin of Materials Science, 2018. – Vol. 41. – №2. – p. 1-7.

69. 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. // Material Science Forum, 2019. – Vol. 970. – p. 297-304.

70. Пат. 2698505 С1 Российская Федерация, МПК G01R 27/02 [Текст]. Устройство для измерения сопротивления изоляции / Ермошин Н.И., Якимов Е.В., Гольдштейн А.Е.; заявл. 04.04.2019; опубл. 28.08.2019, Бюл. №25 – 12 с.: ил.

71. 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.

72. Суранов, А.Я. LabVIEW 8.20: Справочник по функциям. / А.Я. Суранов. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 536 с.

73. Specifications NI USB-6002 Low-Cost DAQ USB Device [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://www.ni.com/pdf/manuals/374371a.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ. (дата обращения 25.11.2019).

ПРИЛОЖЕНИЕ А. АКТ ВНЕДРЕНИЯ РАЗРАБОТКИ В УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС ТПУ

«УТВЕРЖДАЮ»
 Директор Инженерной школы
 неразрушающего контроля и
 безопасности Национального
 исследовательского Томского
 политехнического университета
 Д.А. Седнев
 « 21 » мар 2021 г.

АКТ о внедрении результатов диссертационной работы Ермошина Николая Ивановича в учебный процесс

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертации Ермошина Николая Ивановича «Методы и средства контроля сопротивления изоляции кабельных изделий», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий» используются в отделении «Контроль и диагностика» инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности при изучении дисциплин «Основы контроля и диагностики» и «Неразрушающий контроль и диагностика» для подготовки бакалавров и магистров по направлениям 12.03.01, 12.04.01 «Приборостроение».

Заведующий кафедрой – руководитель
 отделения (на правах кафедры)
 контроля и диагностики,
 д.ф.-м.н., профессор

 А.П. Суржиков

Доцент отделения
 контроля и диагностики, к.т.н.

 Е.В. Якимов

Доцент отделения
 контроля и диагностики, к.т.н.

 Г.В. Вавилова

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. АКТ ИСПЫТАНИЙ МАКЕТА ТЕРАОММЕТРА Т-01



ООО «НПО Редвилл», 634034, Томская обл., г. Томск, ул. Усова д. 15, кв. 34, т/ф. 8 (3822) 22-43-35 Web: www.redvill.ru, E-mail: sales@redvill.ru, Skype: hivolt, ИНН 7014052724, КПП 701701001, ОГРН 1097014001545, ОКВЭД 73.10, ОКПО 61228183, Р/сч 40702810474790000268
Сибирский Филиал ПАО РОСБАНК г. Красноярск.

«УТВЕРЖДАЮ»



Директор ООО «НПО Редвилл», к.т.н.

В.В. Редько

«13» 03 2021 г.

АКТ
испытаний макета тераомметра Т-01

«13» марта 2021 г.

г. Томск

Комиссия в составе:

председателя	к.т.н., директор ООО «НПО Редвилл»	В.В. Редько
и членов комиссии	к.т.н., главный метролог НПО «Редвилл»	Е.М. Федоров
	к.т.н., доцент ОКД ИШНКБ ТПУ	Е.В. Якимов

провела испытания:

1) По определению основных метрологических параметров макета тераомметра Т-01 (далее тераомметр Т-01) с использованием в качестве контрольных образцов набора высокоточных резисторов из диапазона 100 кОм...10 ТОм.

2) По определению быстродействия тераомметра Т-01 при контроле сопротивления изоляции кабельных изделий с различными характеристиками.

3) По определению эффективности реализованных в приборе методов уменьшения влияния внешних электромагнитных помех на результаты контроля сопротивления изоляции кабельных изделий.

Испытания проведены в ООО НПО «Редвилл». Тераомметр Т-01 реализован Ермошиным Н.И. в рамках подготовки диссертационной работы.

1. Комиссией установлено:

1.1. Относительная погрешность тераомметра Т-01 не превышает 10% в диапазоне измерения 100 кОм...10 ТОм.

1.2. Время измерения сопротивления изоляции кабеля не более 60 с.

1.3. Методы уменьшения влияния внешних электромагнитных помех на результаты контроля сопротивления изоляции кабельных изделий, реализованные в тераомметре Т-01 являются эффективными.

1.4. Тераомметр Т-01 выдержал испытания.

2. Выводы:

2.1. Метрологические характеристики тераомметра Т-01 соответствуют установленным техническим требованиям, содержащимся в техническом описании.

2.2. Подтверждена целесообразность серийного изготовления тераомметров на основе технических решений, использованных в макете тераомметра Т-01.

Председатель комиссии

Члены комиссии

В.В. Редько
Е.М. Федоров
Е.В. Якимов

ПРИЛОЖЕНИЕ В. АКТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ



ООО «НПО Редвилл». 634034, Томская обл., г. Томск, ул. Усова д. 15, кв. 34, т/ф. 8 (3822) 22-43-35 Web: www.redvill.ru, E-mail: sales@redvill.ru, Skype: hivolt, ИНН 7014052724, КПП 701701001, ОГРН 1097014001545, ОКВЭД 73.10, ОКПО 61228183, Р/сч 40702810474790000268
Сибирский филиал ПАО РОСБАНК г. Красноярск.

«УТВЕРЖДАЮ»



Директор ООО «НПО Редвилл», к.т.н.

В.В. Редько

03 2021 г.

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы Ермошина Николая Ивановича

«Методы и средства контроля сопротивления изоляции кабельных изделий».

«13» марта 2021 г.

г. Томск

Комиссия в составе:

председателя

к.т.н., директор ООО «НПО Редвилл»

В.В. Редько

и членов комиссии

к.т.н., главный метролог НПО «Редвилл»

Е.М. Федоров

к.т.н., доцент ОКД ИШНКБ ТПУ

Е.В. Якимов

составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы «Методы и средства контроля сопротивления изоляции кабельных изделий», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук использованы в научно-производственной деятельности ООО «НПО Редвилл» при разработке тераомметра для контроля сопротивления изоляции кабельных изделий в виде:

1. Результатов теоретических и экспериментальных исследований метода повышения быстродействия и точности измерений тераомметра при контроле сопротивления изоляции кабельных изделий.
2. Результатов теоретических и экспериментальных исследований влияния низкочастотных помех на показания тераомметра при контроле сопротивления изоляции кабельных изделий.
3. Разработанного метода компенсации низкочастотных помех при контроле сопротивления изоляции кабельных изделий.
4. Алгоритма адаптивной обработки сигнала с использованием минимальных и максимальных отклонений и его программной реализации.
5. Макетного варианта тераомметра Т-01.

Использование указанных результатов и рекомендаций позволяет обеспечить высокие метрологические и эксплуатационные характеристики тераомметра при контроле сопротивления изоляции кабельных изделий в производственных условиях.

В дальнейшем планируется использовать предложенный в диссертационной работе эффективный метод компенсации низкочастотных помех при контроле сопротивления изоляции кабельных изделий на базе двухканальной схемы преобразователя сопротивления в напряжение с Т-образной обратной связью и алгоритмом обработки сигнала с оценкой параметров помехи по минимальным и максимальным отклонениям значения сигнала, который обеспечивает вычитание низкочастотных помех из полезного сигнала.

Новизна предложенных решений подтверждена патентом РФ на изобретение.

Председатель комиссии

В.В. Редько

Члены комиссии

Е.М. Федоров

Е.В. Якимов