

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

На правах рукописи

Вавилова Галина Васильевна

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ ПОГОННОЙ
ЕМКОСТИ ОДНОЖИЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОВОДА
В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА**

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 – 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ЕМКОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОВОДА	16
1.1 Основные понятия.....	16
1.2 Обзор методов измерения емкости	20
1.2.1 Метод вольтметра-амперметра	20
1.2.2 Мостовой метод.....	22
1.2.3 Резонансный метод	23
1.2.4 Метод переходного процесса.....	25
1.2.5 Метод фазового сдвига	27
1.2.6 Методы измерения емкости одножильного провода	28
1.3 Контроль емкости электрического провода	28
1.3.1 Контроль емкости провода согласно нормативным документам .	30
1.3.2 Влияние на результат измерения емкости провода по ГОСТ 27893- 88 свойств воды, выполняющей функции измерительного электрода, и температурных условий измерения	32
1.4 Технологический контроль емкости электрического провода	37
1.4.1 Выбор измерительного преобразователя, применимого для технологического контроля емкости провода	39
1.4.2 Реализации измерительного преобразователя емкости провода на основе трубчатого электрода.....	46
1.5 Выводы по главе 1.....	51
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРОЕМКОСТНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПОГОННОЙ ЕМКОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОВОДА	53
2.1 Требования к конструкции электроемкостного измерительного преобразователя	54
2.2 Определение оптимальных параметров измерительного преобразователя на основе компьютерного моделирование.....	56
2.3 Выводы по главе 2.....	67
ГЛАВА 3. АЛГОРИТМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СИГНАЛА.....	68

3.1 Экспериментальное исследование влияния на функцию преобразования электропроводности воды	69
3.2 Методы отстройки от влияния изменения электропроводности воды .	72
3.2.1 Отстройка от влияния изменения электропроводности воды на основе измерения фазы тока измерительного электрода	73
3.2.2 Отстройка от влияния изменения электропроводности воды на основе измерения тока генератора.....	76
3.3 Выводы по главе 3.....	79
ГЛАВА 4. ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЯ ЕМКОСТИ	80
4.1 Измеритель емкости САР-10	80
4.1.1 Алгоритм программного преобразования сигнала измерительной информации в САР-10.....	82
4.1.2 Техническая реализация измерителя емкости САР-10	85
4.2 Техническая реализация измерителя емкости САР-10.1	88
4.3 Использование измерителя емкости САР-10 для обнаружения локальных дефектов изоляции провода.....	90
4.4 Выводы по главе 4.....	92
ГЛАВА 5. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЯ ЕМКОСТИ САР-10	94
5.1 Первичная настройка САР-10.....	95
5.2 «Рабочая» настройка измерителя емкости САР-10.....	97
5.3 Реализация программной автоматизированной корректировки	99
5.4 Калибровка.....	102
5.5 Выводы по главе 5.....	104
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ	105
СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ	105
ПРИЛОЖЕНИЕ А. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕЙСТВИТЕЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЕ ЕМКОСТИ ОБРАЗЦОВ ПРОВОДА	111
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ «РАБОЧЕЙ» НАСТРОЙКИ И КАЛИБРОВКИ ДЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЯ ЕМКОСТИ САР-10.1.....	120
ПРИЛОЖЕНИЕ В. АКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	125
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	127

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Кабельные изделия широко применяются в различных сферах. Без них невозможно представить современную жизнь: кабели используются для передачи и распределения электрической энергии, обеспечения телефонной и телеграфной связи, для радио- и телевидения, соединения различной электрической аппаратуры и т.д. Постоянно растет потребность кабельной продукции в энергетике, системах передачи информации, в различных областях науки и техники, а также в быту. Потребители кабельных изделий предъявляют все более высокие требования к их качеству. Качество кабельных изделий определяется соответствием требованиям стандартов и технических условий различных параметров: геометрических, электрических, физико-механических и прочих [1-3].

Обязательным этапом при производстве кабельных изделий является выходной контроль, порядок которого регламентируется соответствующими нормативными документами [5-8]. Данный вид контроля проводится на отрезке уже готового изделия, и информация о годности кабельного изделия становится известной после завершения процесса производства, когда уже нет возможности внести какие-либо коррективы в технологический процесс.

С экономической точки зрения, при производстве кабельных изделий необходимо обеспечивать до 100% выхода годных изделий. В случае обнаружения брака оперативное вмешательство в технологический процесс может существенно сократить экономические затраты, поэтому для уменьшения брака необходимо совершенствовать технологию контроля в процессе производства [1-4].

Для кабелей связи, кабелей управления, радиочастотных кабелей одним из наиболее важных параметров является волновое сопротивление, постоянство которого по всей длине кабеля определяет качество передачи информации. Значение волнового сопротивления, в первую очередь, определяется электрической емкостью. Емкостью кабельного изделия

считается емкость между токопроводящей жилой и другим электродом, охватывающим поверхность изоляционной оболочки. Это может быть экран, металлическая оплетка или вторая жила кабеля.

Качество большинства кабельных изделий можно оценить по соответствию конструктивных размеров требованиям стандартов. Для этого необходимо контролировать соответствие требованиям нормативных документов геометрических размеров кабельных изделий, таких, как диаметр жилы, диаметр внешней оболочки изоляции, толщина изоляции, эксцентricность (смещение центра жилы от центра кабеля). Также важным для качества кабельных изделий является отсутствие в конструкции кабельного изделия различного рода дефектов изоляции, например: трещин, порезов, локальных увеличений и уменьшений внешнего диаметра изоляции, инородных включений в изоляции [2, 13-14].

К основным электрическим параметрам кабельных изделий относятся сопротивление жилы постоянному току, сопротивление изоляции, емкость, индуктивность, волновое сопротивление и т.д. [1-2, 11].

Погонная емкость является одной из основных нормируемых величин, определяющих качество кабельного изделия. Известно, что емкость провода в значительной степени зависит от его геометрических размеров и электрических свойств изоляции. Поэтому изменение погонной емкости может свидетельствовать об отклонении каких-либо геометрических параметров провода или электрических характеристик изоляции. Кроме того, резкое изменение емкости является показателем наличия несплошностей в изоляции (трещин, порезов, инородных включений и т.д.), так как при этом наблюдается резкое, скачкообразное изменение геометрических параметров провода и электрических характеристик изоляции.

Таким образом, постоянство как электрических, так и геометрических параметров можно контролировать, измеряя емкость провода.

Потребность обеспечения постоянства электрических и геометрических параметров по всей длине кабельного изделия приводит к

необходимости осуществлять постоянный контроль емкости непосредственно в процессе производства. Емкость обуславливается характеристиками технологического процесса нанесения изоляции на токопроводящую жилу, поэтому контроль емкости целесообразно проводить в процессе экструзии [15-16].

В настоящее время приборы для технологического контроля емкости разрабатываются, главным образом, зарубежными фирмами Sikora (Германия), Zumbach (Швейцария), Proton Products (Великобритания), а также фирмой НПО Редвилл (Россия) [17-23]. Ограничение использования приборов зарубежного производства связано с их высокой стоимостью и трудоемкостью обслуживания в условиях отечественных кабельных предприятий. Также немаловажным фактом является требование импортозамещения. Поэтому у кабельной промышленности есть потребность в отечественных приборах для контроля емкости, учитывающих эксплуатационные особенности российского производства кабельных изделий.

Прибор для контроля емкости провода должен обладать следующими свойствами:

- малой чувствительностью к изменениям внешних факторов: температуры воды, используемой при измерении емкости в процессе производства, химического состава воды, концентрации примесей в воде и т.п.;
- надежностью работы в реальных условиях эксплуатации на отечественных кабельных предприятиях;
- низкой стоимостью;
- простотой обслуживания;
- удобством встраивания прибора в информационную сеть кабельного предприятия.

Цель диссертационной работы – разработка методов и средств контроля погонной емкости электрического одножильного провода в процессе производства на стадии нанесения изоляции на токопроводящую жилу.

Для достижения указанной цели в работе необходимо решение следующих **задач**:

- исследование степени влияния изменения свойств воды, выполняющей функции измерительного электрода, на результат измерения емкости провода;
- разработка конструкции измерительного преобразователя для технологического контроля погонной емкости электрического провода;
- определение оптимальных конструктивных параметров измерительного преобразователя, позволяющих обеспечить минимальную зависимость результата измерения емкости провода от его геометрических размеров, электрических свойств изоляции и изменения электропроводности воды;
- разработка алгоритма преобразования сигналов измерительной информации в значение емкости контролируемого провода, реализующего отстройку от влияния изменения электропроводности воды;
- техническая реализация измерителя емкости, позволяющая осуществлять отстройку результата измерения емкости провода от влияния изменения электропроводности воды;
- разработка методики проведения настройки измерителя емкости, позволяющей исключить систематическую погрешность при измерении погонной емкости провода, а также методики его калибровки.

Объектом исследования является контроль параметров изделий в кабельной промышленности.

Предмет исследования – погонная емкость провода как самостоятельного изделия или составной части кабеля связи.

Методы исследования. В работе были использованы методы решения уравнений математической физики, методы цифровой обработки данных, методы компьютерного моделирования с использованием пакетов прикладных программ MathCad, Comsol Multiphysics, аппарат теории вероятностей и математической статистики, теории погрешностей для обработки экспериментальных данных.

Научная новизна диссертационной работы состоит в том, что впервые

- предложена методика расчета и оптимизации основных конструктивных параметров электроемкостного измерительного преобразователя, обеспечивающая минимальную зависимость результата измерения емкости провода от его геометрических размеров, электрических свойств изоляции и изменения электропроводности воды;
- разработаны методы отстройки от влияния изменения электропроводности воды на основе определения фазы тока измерительного электрода и измерения тока генератора;
- разработана методика проведения первичной настройки измерителя емкости, позволяющая обеспечить требуемую функцию преобразования сигналов измерительной информации.

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. Конструкция электроемкостного измерительного преобразователя обеспечивающая высокую однородность поля в продольном направлении измерительной зоны преобразователя и минимизацию методической погрешности измерения за счет влияния геометрических размеров провода, электрических свойств изоляции и изменения электропроводности воды.

2. Метод отстройки от влияния изменения электропроводности воды на основе измерения фазы тока измерительного электрода, уменьшающий погрешность измерения погонной емкости провода до 2,5 % в диапазоне изменения емкости от 50 до 500 пФ/м и в диапазоне изменения солености воды от 0 до 4 г/л.

3. Метод отстройки от влияния изменения электропроводности воды на основе измерения тока генератора, обеспечивающий уменьшение погрешности измерения погонной емкости провода до 2,0 % в тех же диапазонах изменения влияющих факторов.

4. Измерители погонной емкости провода САР-10 и САР-10.1, реализованные с использованием предложенных конструкции электроемкостного измерительного преобразователя и алгоритмов преобразования сигналов измерительной информации, обеспечивающие погрешность измерения не более 2,5 % в диапазоне изменения емкости провода от 50 до 500 пФ/м в условиях изменения солености воды от 0 до 4 г/л.

Практическая значимость работы заключается в том, что

1) разработанные в диссертации методы и средства технологического контроля емкости позволят решить задачу минимизации брака, улучшения качества выпускаемой продукции кабельного производства, уменьшения материальных затрат, что, соответственно, снизит себестоимость кабельных изделий, повысит энергоэффективность кабельного предприятия, решит задачи импортозамещения иностранных приборов на отечественных кабельных предприятиях;

2) разработаны методики калибровки и настроек измерителя емкости;

3) разработанные в диссертации измерители емкости провода позволят расширить линейку приборов для кабельной промышленности, разрабатываемых и выпускаемых отечественными предприятиями;

4) результаты работы внедрены в учебный процесс студентов, обучающихся по направлению «Приборостроение»;

5) результаты работы использованы для разработки измерителя емкости САР-10.1, подготавливаемые к серийному выпуску фирмой ООО «НПО Редвилл» (г. Томск, Россия).

Апробация работы. Результаты проведенных исследований обсуждались на Международной научно-технической конференции «Измерение, контроль, информатизация» (г. Барнаул, 2013 г., 2014 г.), на Всероссийской с международным участием научно-практической конференции по инновациям в неразрушающем контроле “SibTest” (г. Томск, 2013 г., 2015 г.), на Научно-практической конференции с международным участием «Информационно-измерительная техника и технологии» (г. Томск, 2013 г., 2014 г., 2015 г.), на Международной научно-практической конференции «Наука, образование и производство - ведущие факторы Стратегии "Казахстан - 2050" (Сагиновские чтения № 6)» (г. Караганда, Казахстан, 2014 г.), на Международной конференции датчиков и сигналов «SENSIG '15» (г. Будапешт, Венгрия, 2015 г.).

Практические результаты работы экспонировались на Международной выставке научно-технических и инновационных разработок «Измерение, мир, человек» (г. Барнаул, 2013 г., 2015 г.), на Выставке научно-технических и инновационных разработок в рамках Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Информационно-измерительная техника и технологии» (г. Томск, 2014 г., 2015 г.).

Значимые результаты работы:

- *Золотая медаль* за разработку «Измеритель погонной емкости одножильного провода для технологического контроля» (авторы Гольдштейн А.Е., Вавилова Г.В., Мазиков С.В.) на V Международной выставке научно-технических и инновационных разработок «Измерение, мир, человек – 2015» (г. Барнаул).

- *Серебряная медаль* за разработку «Методика отстройки от влияния изменения электропроводности воды на результаты технологического контроля погонной емкости электрического кабеля» (авторы Вавилова Г.В., Гольдштейн А.Е.) на III Международной выставке научно-технических и инновационных разработок «Измерение, мир, человек – 2013» (г. Барнаул).

- *Серебряная медаль* за разработку «Макет измерителя погонной емкости кабеля» (авторы Гольдштейн А.Е., Вавилова Г.В.) на III Международной выставке научно-технических и инновационных разработок «Измерение, мир, человек – 2013» (г. Барнаул).

- *Диплом* за научную работу «Отстройка от влияния изменения электропроводности воды на результаты технологического контроля погонной емкости электрического кабеля» на XV Международной научно-технической конференции «Измерение, контроль, информатизация – 2014» (г. Барнаул).

- *Диплом II степени* за научную разработку «Устройство для контроля погонной емкости кабелей» (авторы Гольдштейн А.Е., Вавилова Г.В., Чапайкина А.В.) на Выставке научно-технических и инновационных разработок в рамках IV Всероссийской с международным участием научно-практической конференции «Информационно-измерительная техника и технологии – 2014» (г. Томск).

Публикации. По результатам исследования опубликовано 22 работы, в том числе 7 статей в рецензируемых изданиях из списка ВАК и 3 статьи, индексируемые в базах Scopus.

Личный вклад автора заключается а) в разработке математической модели емкостного измерительного преобразователя и методики подбора его оптимальных конструктивных параметров; б) в проведении экспериментальных исследований влияния изменений электропроводности воды на результат измерения погонной емкости провода; в) в разработке алгоритма преобразования выходного сигнала измерительного преобразователя в значение емкости провода при использовании отстроек от влияния изменения электропроводности воды; г) в разработке методик первичной, «рабочей» настроек, а также методики калибровки измерителей емкости САР-10 и САР-10.1; д) в проведении лабораторных и заводских испытаний измерителя емкости САР-10 и лабораторных испытаний прототипа САР-10.1.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 86 источников и трех приложений. Работа содержит 140 страниц текста, 45 рисунков, 2 таблицы.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, определены научная новизна и практическая значимость результатов, представлены основные положения, выносимые на защиту, описана структура диссертационной работы.

В первой главе представлен обзор существующих методов измерения емкости. Для осуществления контроля емкости провода в процессе его производства выбран наиболее простой и легко реализуемый метод амперметра-вольтметра. Этот метод заключается в измерении силы тока, по значению которой при известных амплитуде и частоте приложенного гармонического напряжения можно судить о значении емкости одножильного электрического провода. Данный метод обладает высокой точностью, помехозащищённостью, быстродействием, а также характеризуется линейной функцией преобразования.

На основе обзора возможных вариантов реализации измерительного преобразователя для проведения контроля емкости провода на стадии нанесения изоляции выбран единственно возможный метод измерения, основанный на использовании трубчатого электрода, погруженного вместе с контролируемым проводом в охлаждающую ванну экструзионной линии.

Анализ стандартов на проведение измерения емкости провода в кабельной промышленности показал, что существуют нормативные документы, регламентирующие порядок только выходного контроля. Выявлены недостатки этих документов в части отсутствия требований к качеству воды, играющей роль измерительного электрода при проведении измерения емкости провода.

Проведен анализ влияния свойств воды на результат контроля, который показал, что изменение температуры, состава и концентрации примеси в водном растворе приводят к существенному влиянию на результат измерения емкости провода вследствие значительного изменения удельной электропроводности воды. Было отмечено, что при увеличении температуры воды для ряда материалов изоляции провода (например, для поливинилхлорида) происходит значительное изменение диэлектрической проницаемости, что также оказывает существенное влияние на результат измерения емкости. Из этого следует, что для определения действительного значения емкости образца провода необходимо проводить измерение в строго определенных условиях, параметры которых целесообразно внести в новую редакцию ГОСТа, регламентирующего методику измерения емкости проводов при проведении испытаний кабельных изделий.

Во второй главе описана конструкция электроемкостного измерительного преобразователя (ЭЕИП), используемого для измерения емкости одножильного электрического провода в процессе его производства. На основе компьютерного моделирования взаимодействия электрического поля электроемкостного измерительного преобразователя с электрическим проводом в среде COMSOL Multiphysics определены оптимальные

конструктивные параметры измерительного преобразователя, позволяющие обеспечить минимальную зависимость результата измерения емкости провода от его геометрических размеров, электрических свойств изоляции и изменения электропроводности воды. Оптимальный вариант конструкции преобразователя обеспечивает однородное электрическое поле внутри измерительного электрода. Подбор оптимальных конструктивных параметров измерительного преобразователя обеспечивает высокую однородность поля в продольном направлении в зоне измерения, что позволяет уменьшить методическую погрешность измерения емкости провода, обусловленную искажением поля на концах измерительного электрода.

В третьей главе разработан алгоритм преобразования выходного сигнала используемого электроемкостного измерительного преобразователя в значение погонной емкости контролируемого провода, обеспечивающую минимизацию влияния основных мешающих факторов. Выявлено, что без учета влияния изменения электропроводности воды погрешность измерения емкости провода в данном диапазоне изменения влияющих факторов может достигать 20 %.

В работе предложены две методики отстройки от влияния изменения электропроводности на результат измерения емкости на основе измерения фазы тока измерительного электрода и на основе измерения тока генератора. Также показана эффективность использования предложенных отстроек.

Четвертая глава посвящена описанию разработки и реализации измерителя емкости САР-10, который предназначен для измерения значений погонной емкости одножильного провода и для записи массива данных значений погонной емкости за заданный интервал времени.

Представленный измеритель емкости САР-10 может реализовывать два вида отстройки от влияния изменения электропроводности воды: на основе определения фазы тока измерительного электрода ЭИП и на основе

определения тока генератора. Приведены основные технические характеристики измерителя.

В настоящее время измеритель емкости готовится к серийному производству. Для этого изготовлен прототип прибора САР-10.1, в котором блок вычислительной обработки сигналов измерительной информации реализуется на микроконтроллере. Для визуализации измерительной информации используется пульт отображения информации и допускового контроля БИ-1.

Показана принципиальная возможность измерители емкости САР-10 выявлять локальные дефекты изоляции провода типа прокол, трещина и т.п., что позволит дополнить возможности дефектоскопии с помощью электроискрового метода контроля.

Пятая глава посвящена метрологическому обеспечению разрабатываемого измерителя емкости САР-10.

Для проведения первичной настройки, «рабочей» настройки и калибровки измерителя емкости САР-10 используются контрольные образцы проводов, изготовленные метрологической службой на кабельном предприятии самостоятельно.

Первичная настройка измерителя емкости САР-10 проводится на этапе его изготовления. Процедура первичной настройки подразумевает определение коэффициентов функции преобразования выходного сигнала ЭЕИП в результат измерения емкости контролируемого провода с использованием отстройки от мешающих факторов.

Задача «рабочей» настройки состоит в определении значения емкости ΔC , пФ/м, на которое необходимо скорректировать показания измерителя емкости для исключения аддитивной и мультипликативной составляющих систематической погрешности. «Рабочая» настройка в измерителе емкости САР-10 осуществляется в автоматизированном режиме.

Также предложена методика проведения калибровки измерителя емкости САР-10 и его модификации САР-10.1.

ГЛАВА 1. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ЕМКОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОВОДА

1.1 Основные понятия

Для описания методов и средств измерения емкости электрического провода необходимо определить основные понятия настоящего исследования.

*Кабельные изделия*¹ - электрические изделия, предназначенные для передачи электрической энергии, электрических сигналов информации, а также служащие для изготовления обмоток электрических устройств. Данные изделия отличаются гибкостью. В зависимости от конструктивных особенностей кабельные изделия разделяются на три основных типа: кабели, провода и шнуры.

Кабель характеризуется наличием одной или более изолированных жил, заключенных в оболочку, поверх которой может накладываться защитный покров.

Шнур представляет собой провод с изолированными жилами повышенной гибкости, служащий для соединения с подвижными устройствами.

Провод состоит из одной или несколько скрученных проволок (изолированных жил) и легкой неметаллической оболочки (изоляции). В ряде случаев поверх изоляции накладывается легкая неметаллическая оболочка. Провод, как правило, не предназначен для прокладки в земле.

Основными элементами провода являются токопроводящая жила и изоляция. *Токопроводящей жилой* называется элемент кабельного изделия, предназначенный для прохождения электрического тока, изготавливаемый

¹ Здесь и далее определения приводятся в соответствии с ГОСТ 15845-80 «Изделия кабельные термины и определения» [24].

обычно из металла с большой проводимостью (алюминия, меди, серебра или их сплавов). *Изоляция* выполняется в виде сплошного слоя диэлектрика (пластмассы, резины и др.), предназначенного для создания электрически прочного диэлектрического промежутка между токопроводящими жилами и другими заземленными элементами кабельного изделия.

Особое внимание в данной работе уделено *кабелям связи*, которые предназначены для передачи сигналов информации токами различных частот.

Одной из основных нормируемых величин, определяющих качество кабелей связи, является его емкость C , Ф. *Емкость электрическая* – это характеристика проводника, количественная мера его способности удерживать электрический заряд, равная отношению заряда q , Кл, накопленного проводником, к его потенциалу φ , В [25]:

$$C = \frac{q}{\varphi}. \quad (1)$$

В системе СИ емкость измеряется в фарадах (Ф).

Емкость одножильного электрического провода с металлическим экраном или оболочкой, а также емкость кабеля с отдельно экранированными жилами определяется по такой же формуле, как и емкость цилиндрического конденсатора, где одной из обкладок является электропроводящая жила провода, а другой – металлический экран (оболочка):

$$C = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)}, \quad (2)$$

где ϵ – диэлектрическая проницаемость изоляционного материала;

ϵ_0 – электрическая постоянная, Ф/м;

l – длина провода, м;

D – диаметр изоляции, мм;

d – диаметр жилы, мм.

Из формулы (2) следует, что емкость провода определяется его геометрическими параметрами, его формой и электрическими свойствами

материала диэлектрика (его диэлектрической проницаемостью ϵ) и не зависит от материала проводника. Емкость кабелей связи измеряется и нормируется в пФ или нФ [1].

Провода, кабели или другие кабельные изделия представляют собой протяженные изделия, длина которых в несколько раз больше его поперечных геометрических размеров.

Для изоляции кабелей, систем параллельных проводов и т.п. часто используют понятие удельной (погонной) емкости. *Погонная (удельная) емкость* – емкость, отнесенная к единице длины кабеля или провода [26]. Погонная емкость кабельного изделия измеряется и нормируется в пФ/м или нФ/км.

Способность материала образовывать емкость характеризуется относительной диэлектрической проницаемостью. *Относительная диэлектрическая проницаемость* – это безразмерная величина ϵ , характеризующая поляризацию диэлектриков под действием электрического поля. Диэлектрическая проницаемость показывает, во сколько раз сила взаимодействия двух свободных зарядов в диэлектрике меньше, чем в вакууме [25].

Другим важным электрическим свойством кабеля (провода) является его сопротивление. *Электрическое сопротивление* – величина, характеризующая противодействие, которое оказывает электрическая цепь (проводник) движущимся в ней электрическим зарядам. Электрическое сопротивление выражается в Омах. Электрическое сопротивление зависит от материала проводника, его конфигурации, внешних условий, частоты электрического тока и других факторов [27].

Для кабельных изделий нормируются электрическое сопротивление токопроводящей жилы, Ом/м (Ом/км), и электрическое сопротивление изоляции, Ом·м (Ом·км).

Электрическое сопротивление изоляции R , Ом, для одножильного электрического провода с металлическим экраном или оболочкой или кабеля с отдельно экранированными жилами определяется по формуле

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{D}{d}, \quad (3)$$

где ρ – удельное объемное сопротивление изоляции, Ом·м;

l – длина провода, м;

D – диаметр изоляции, мм;

d – диаметр жилы, мм.

Удельное объемное сопротивление ρ , Ом·м определяется по формуле

$$\rho = \frac{1}{\sigma}, \quad (4)$$

где σ – удельная электрическая проводимость изоляции, См/м.

Удельная электрическая проводимость – физическая величина σ , См/м (См/см), равная электропроводности цилиндрического проводника единичной длины и единичной площади сечения [25]. *Электрическая проводимость* – это способность тела проводить электрический ток под воздействием электрического поля [28].

Поскольку данная работа относится к области электрического неразрушающего контроля, важно определить понятие *электрический неразрушающий контроль (электрический контроль)*, которое в ГОСТе 25315-82 «Контроль неразрушающий электрический. Термины и определения» [29] обозначено как контроль, основанный на регистрации параметров электрического поля, взаимодействующего с объектом контроля. Метод электрического контроля, основанный на регистрации емкости участка объекта контроля, называется *электроемкостным методом контроля (электроемкостный метод)* [29-30].

1.2 Обзор методов измерения емкости

Существует большое количество методов измерения емкости. Из них наибольшее распространение получили метод вольтметра-амперметра, мостовой метод, резонный метод, метод переходного процесса, метод фазового сдвига.

1.2.1 Метод вольтметра-амперметра

Метод вольтметра-амперметра достаточно прост в реализации и сводится к измерению тока и напряжения в цепи с измеряемым объектом и последующему расчету его параметров по закону Ома.

Схема для измерения емкости методом вольтметра-амперметра представлена на рисунке 1.

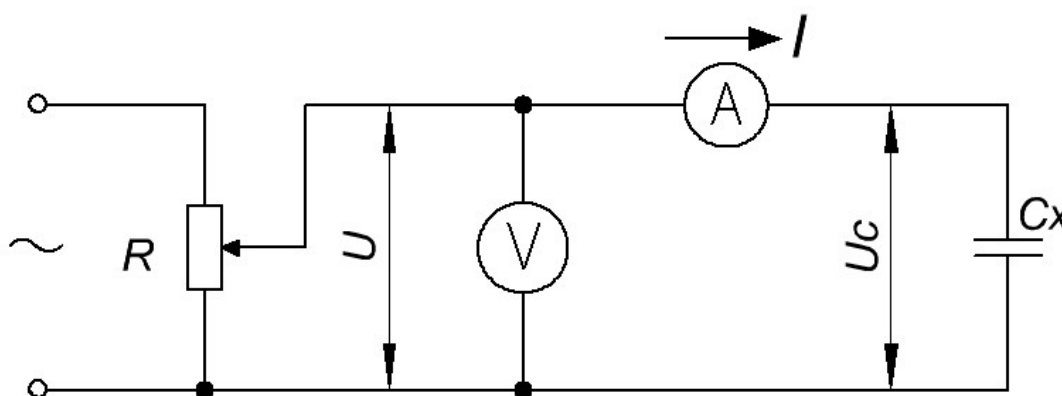


Рисунок 1 – Схема измерения емкости методом вольтметра-амперметра

Емкостное сопротивление конденсатора X_C , Ом

$$X_C = \frac{U_C}{I} = \frac{1}{\omega C_x}, \quad (5)$$

где U_C – падение напряжение на конденсаторе, В;

I – ток в цепи конденсатора, А;

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ – угловая частота источника питания, Гц.

Преобразовав формулу (5), емкость конденсатора можно определить по формуле

$$C_x = \frac{I}{\omega U_C}. \quad (6)$$

С использованием схемы, изображенной на рисунке 1, можно измерять только высокодобротные емкости. Реальный конденсатор обладает активным и реактивным сопротивлением. Схема замещения реального конденсатора обычно приводится в виде параллельной схемы (рисунок 2а). Векторная диаграмма тока и напряжения (рисунок 2б) характеризует работу конденсатора в цепи переменного синусоидального тока. Для определения параметров конденсатора (активного r , Ом и емкостного сопротивления X_C , Ом) необходимо измерять по отдельности токи, протекающие через активную составляющую объекта измерения I_r и емкостную составляющие I_c .

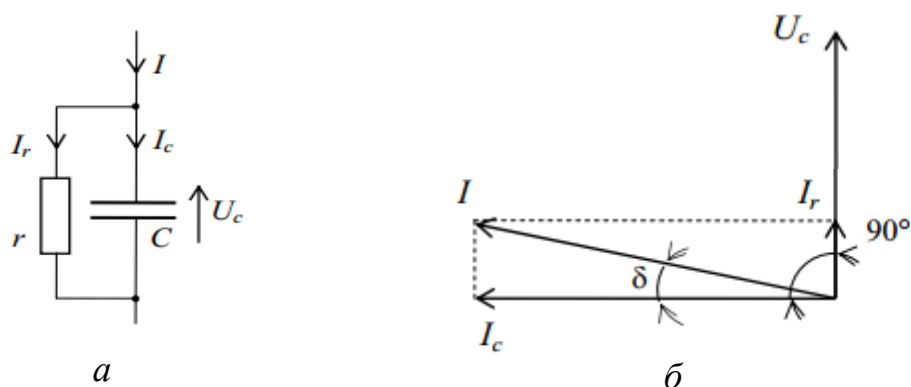


Рисунок 2 – Схема замещения (а) и векторная диаграмма (б) емкости конденсатора

Тогда емкость конденсатора C_x определяется реактивным током I_c по формуле (6), а эквивалентное активное сопротивление конденсатора – по формуле

$$r = \frac{U_C}{I_r}. \quad (7)$$

Наличие тока I_r , протекающего через эквивалентное активное сопротивление r , приводит к отклонению фазового сдвига между суммарным током I и напряжением на конденсаторе U_C от 90° . Угол δ , образованный

векторами емкостного и суммарного тока, называется углом потерь. Тангенс угла потерь при параллельной схеме замещения определяется выражением

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{1}{\omega rC}. \quad (8)$$

Величина, обратная $\operatorname{tg}\delta$, называется добротностью Q и вычисляется по формуле

$$Q = \omega rC. \quad (9)$$

Погрешность измерения указанным методом составляет 0,5–5 % на низких частотах и возрастает при увеличении частоты, но ее легко устранить с помощью настройки [31].

Недостатком данного метода является ограниченный диапазон по частоте.

К преимуществам метода относится возможность через измеряемый объект пропускать такой же ток, как и в реальных условиях его эксплуатации. Немаловажным также является линейность функции преобразования. Кроме того, метод обладает высоким быстродействием и малой погрешностью измерения [32].

1.2.2 Мостовой метод

Мостовой метод получил широкое распространение при измерении емкости, так как мостовые схемы обладают высокой точностью и чувствительностью, способны работать в широком диапазоне измеряемых значений. Для измерения емкости конденсаторов с малыми потерями используют мостовую схему, изображенную на рисунке 3.

Условие равновесия моста для схемы (рисунок 3) имеет вид:

$$\left(R_x - \frac{j}{\omega C_x} \right) R_4 = \left(R_3 - \frac{j}{\omega C_3} \right) R_2. \quad (10)$$

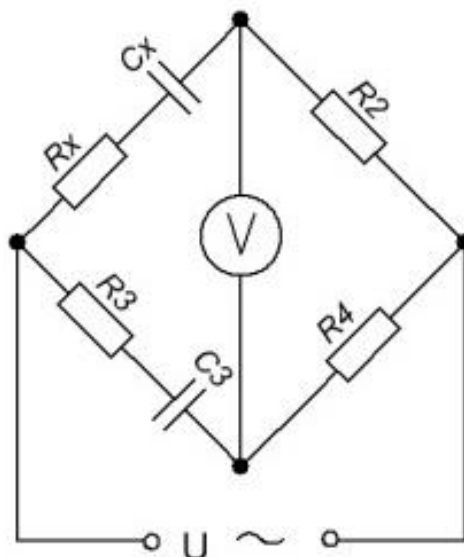


Рисунок 3 – Схема моста для измерения емкости конденсатора

Разделив в уравнении (10) вещественную и мнимую части, получим:

$$R_x = \frac{R_3 R_2}{R_4}, \quad C_x = \frac{C_3 R_4}{R_2}. \quad (11)$$

Уравновешивание мостовой схемы производится поочередным изменением сопротивления R_3 и емкости C_3 . Для расширения пределов измерения необходимо изменить отношение $\frac{R_2}{R_4}$ (или $\frac{R_4}{R_2}$) [33].

К достоинствам мостового метода относят высокую точность измерения, так как данный метод относится к методам непосредственной оценки. Однако он очень сложен для реализации: возникают сложности с подготовкой мер, особенно в широком диапазоне измерения.

1.2.3 Резонансный метод

Резонансный метод измерения применяется в высокочастотных измерителях емкостей, так как в области низких частот резонансные явления проявляются слабо, что не обеспечивает достаточной точности измерения. Одна из разновидностей метода – генераторный резонансный метод – основана на использовании образцового генератора G_0 и индикатора

равенства частот ИРЧ, который служит для контроля частоты колебательного контура, питаемого от своего генератора G [34]. Схема измерителя емкостей приведена на рисунке 4.

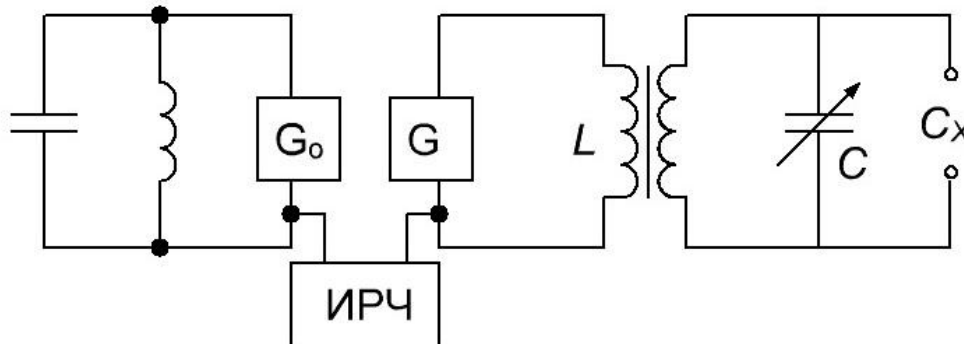


Рисунок 4 – Схема измерения емкости резонансным методом

Первоначально колебательный контур генератора G без подключения измеряемой емкости C_x , Φ , настраивается в резонанс на частоту образцового генератора G_0 путем изменения емкости C . При равенстве частот обоих генераторов (определяется с помощью ИРЧ) значение емкости C (C_1) фиксируется. Затем в колебательный контур генератора G включается измеряемая емкость C_x параллельно емкости C и контур снова настраивается в резонанс на ту же частоту. Новое значение емкости переменного конденсатора C (C_2) фиксируется. Емкость образца C_x определяется по формуле

$$C_x = C_1 - C_2. \quad (12)$$

К преимуществам генераторного метода можно отнести достаточную простоту схемотехнического решения и, как следствие этого, низкую стоимость измерителей.

Индикация равенства частот обеспечивает высокую разрешающую способность метода, что позволяет использовать его для измерения малых изменений параметров компонентов. Погрешность измерения указанным методом может достигать 0,5% [31].

Основным недостатком метода является зависимость частоты измерения от значения емкости измеряемого объекта, т. е. невозможность

измерения на какой-либо заранее выбранной фиксированной частоте, а также слабая защищенность от паразитных параметров, присущая всем двухзажимным измерителям.

1.2.4 Метод переходного процесса

В основу метода положен аperiodический процесс, возникающий при подключении заряженного конденсатора к образцовому резистору. При измерении сопротивления обеспечивают разряд конденсатора через измеряемый образцовый резистор.

Структурная схема измерителя емкости, реализующая метод переходного процесса, приведена на рисунке 5.

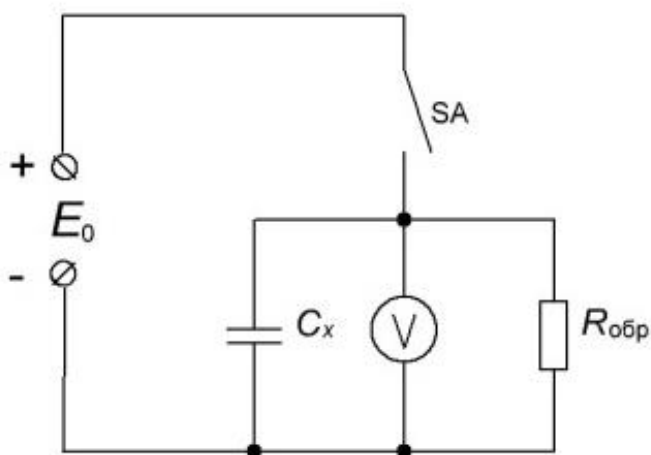


Рисунок 5 – Структурная схема измерителя емкости, реализующая метод переходного процесса

При замыкании ключа SA конденсатор C_x заряжается до напряжения E_0 . При размыкании ключа SA конденсатор C_x начинает разряжаться через образцовый резистор $R_{обр}$ по экспоненциальному закону (рисунок б), который описывается выражением

$$U_c = E_0 e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (13)$$

где E_0 – напряжение на конденсаторе в момент времени $t = 0$, В;

$\tau = R_{обр} C_x$ – постоянная времени цепи разряда, с.

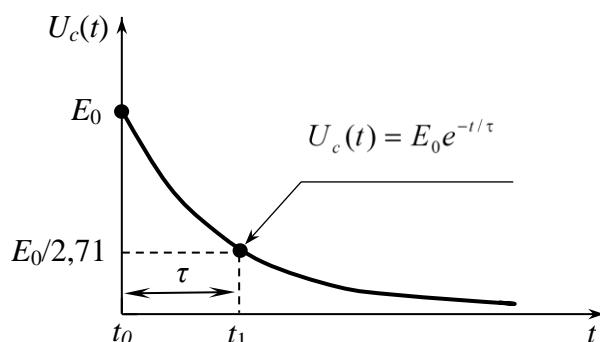


Рисунок 6 – Временная диаграмма разрядки конденсатора C_x

Если $t = \tau$, то из (13) получим

$$e^{-\frac{t}{\tau}} = e^{-1} = \frac{1}{2,718} = 0,3679. \quad (14)$$

Следовательно, за время τ напряжение между обкладками конденсатора уменьшится до $0,3679E_0$ (рисунок 6). Зная сопротивление резистора $R_{обр}$, Ом, через который разряжается конденсатор, и экспериментально определив время t , с разрядки конденсатора, легко рассчитать емкость конденсатора по формуле

$$C_x = \frac{t}{R_{обр}}. \quad (15)$$

Если сопротивление резистора $R_{обр}$ много меньше внутреннего сопротивления вольтметра, то его можно не учитывать. В противном случае, в формулу (15) вместо значения $R_{обр}$ подставляется общее сопротивление параллельно соединенных резистора и вольтметра [33].

Погрешность измерений методом переходного процесса составляет 0,1-0,2 % и зависит, главным образом, от нестабильности сопротивлений резисторов $R_{обр}$, а также неточности определения времени t .

К достоинствам метода можно отнести достаточно высокую точность измерений, а к недостаткам – невозможность измерения параметров на рабочей частоте [35].

1.2.5 Метод фазового сдвига

Фазовым сдвигом φ называется модуль разности начальных фаз двух гармонических сигналов одной частоты. Известно, что для схемы, представленной на рисунке 7а, разность фаз сигналов напряжение на резисторе U_R и конденсаторе U_C составляет 90° (рисунке 7б), а фаза напряжения на входе RC -цепи будет отличаться от фазы напряжения на конденсаторе на величину φ , зависящую от параметров R и C .

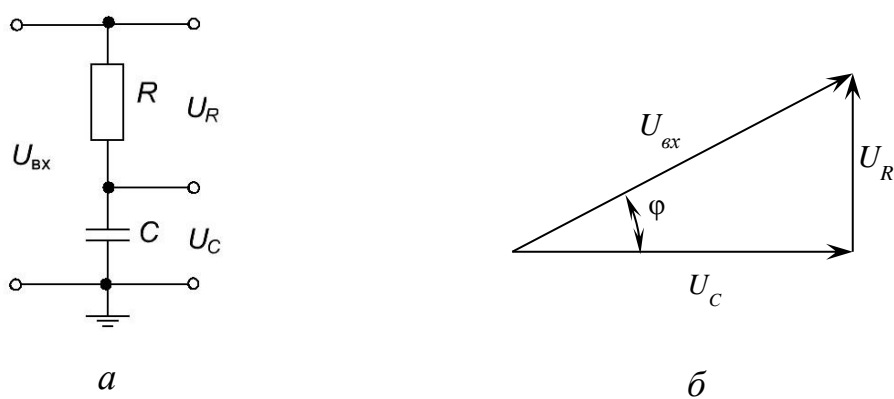


Рисунок 7 – Схема (а) и векторная диаграмма напряжения (б) при измерении емкости конденсатора C_x методом фазового сдвига

Значение фазового сдвига можно определить по формуле:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_R}{U_C} = \frac{R \cdot I}{X_C} = \omega C_x R. \quad (16)$$

Отсюда емкость конденсатора в последовательной RC – цепи можно определить по формуле

$$C_x = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\omega R}. \quad (17)$$

Данный метод обладает высокой нелинейностью, изменение чувствительности, в связи с этим не удобен для измерения емкости при значительном диапазоне ее изменения.

1.2.6 Методы измерения емкости одножильного провода

На основе обзора существующих методов измерения емкости для осуществления контроля емкости провода в процессе его производства выбран наиболее простой и легко реализуемый метод амперметра-вольтметра, позволяющий по значению тока в цепи судить о значении емкости одножильного электрического провода (см. раздел 1.2.1).

Данный метод позволяет осуществлять измерение емкости в широком диапазоне, характеризуется линейной функцией преобразования, что позволяет обеспечить погрешность измерения не более 0,5 %. Кроме того этот метод обладает высоким быстродействием, что очень важно при технологическом процессе производства провода, так как провод может двигаться со скоростью до 2000 м/мин.

Влияние внешних факторов легко скорректировать. Поэтому данный метод является наиболее подходящим для решения поставленной задачи.

1.3 Контроль емкости электрического провода

Согласно ГОСТ 15467-79 «Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения» [36] *качество продукции* – это совокупность свойств продукции, обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением. Проверка соответствия показателей качества продукции установленным требованиям (производителя, заказчика, потребителя) проводится при проведении *контроля качества продукции* [36]. Качество выпускаемых кабельных изделий контролируется при проведении испытаний. Испытание кабелей и проводов является завершающей стадией технологического процесса производства. *Испытание* любого объекта – это экспериментальное определение количественных и/или качественных характеристик свойств объекта при внешнем воздействии [37-38].

На кабельных заводах действует система технического контроля и управления качеством выпускаемой продукции. Основная задача технического контроля кабельного производства заключается в обеспечении уровня качества выпускаемой продукции в соответствии действующей нормативно-технической документацией [2].

Контроль качества – любая плановая и систематическая деятельность, задача которой гарантированно подтверждать то, что производимые предприятием изделия соответствуют установленным требованиям (стандартам). Стандартная система производственного контроля качества подразделяется на три этапа: входной контроль материалов, технологический (операционный) контроль на каждом этапе производства, выходной (приемочный) контроль готовой продукции [38].

Входной контроль заключается в проверке качества сырья, полуфабрикатов и вспомогательных материалов (электроизоляционные материалы, проводниковые материалы, металлы для оболочек и брони), поступающих на предприятие и используемых для производства [38]. Использование качественного сырья и материалов позволяет повысить качество производимой продукции.

Технологический (операционный) контроль проводится во время выполнения или после завершения технологической операции [38]. Технологический контроль заключается в проверке соблюдения технологических режимов, правил хранения и упаковки продукции между операциями. Технологический контроль является одним из видов предупредительного контроля, который направлен на предупреждение различных отклонений от нормального производственного процесса, для предотвращения появления дефектов на производимой продукции [39].

Выходной (приемочный) контроль – контроль качества готовой продукции. На выходном контроле устанавливается, соответствует ли качество готовых изделий требованиям стандартов или технических условий,

а также выявляются возможные дефекты готовой продукции. Если все условия выполнены, то продукцию можно реализовывать.

Технологический и выходной виды контроля взаимно дополняют друг друга, обеспечивая требуемое качество выпускаемой продукции [39].

Для проверки эффективности ранее выполненного контроля специально уполномоченные люди могут осуществить *инспекционный контроль* [38].

1.3.1 Контроль емкости провода согласно нормативным документам

В настоящее время существуют стандарты, регламентирующие порядок только выходного контроля емкости провода [5-9]. На территории Российской Федерации действует ГОСТ 27893-88 «Кабели связи. Методы испытаний» [5], определяющий порядок проведения испытаний кабелей связи на соответствие различных параметров, в том числе и измерение емкости.

Для проведения выходного контроля емкости используется отрезок готового провода. Образец провода должен иметь длину не менее 5 м. Перед проведением измерений образец должен быть выдержан при нормальных климатических условиях не менее одного часа. Испытания проводятся в нормальных климатических условиях, соответствующих ГОСТу 20.57.406-81 «Комплексная система контроля качества. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические. Методы испытаний» [40], если нормативно-техническая документация не требует другого. Нормальные климатические условия характеризуются следующими значениями климатических факторов:

- температура воздуха от 15 до 35 °С;
- относительная влажность воздуха от 45 до 80 %;
- атмосферное давление от 84 до 106 кПа.

Рассматриваемый в данной работе одножильный электрический провод не имеет в своей конструкции металлической оболочки или экрана, поэтому для проведения измерения емкости образец провода помещается в металлический заземленный бак, заполненный водой. Один конец образца присоединяется к измерительному прибору, второй остается свободным, не погруженным в воду. Электрическая емкость измеряется между жилой и водой. Измеренное значение емкости, выраженное в нФ, пересчитывается на 1 км длины провода. Следует обратить внимание, что допускается использовать в качестве единицы измерения для погонной емкости провода – пФ/м. Если полученное в результате измерения значение емкости (погонной емкости) соответствует значениям, указанным в нормативно-технической документации на соответствующий тип провода, то провод считается выдержавшим испытание.

Составной частью измерительной системы при измерении емкости провода является вода, в которую погружается исследуемый образец провода. Отметим, что в ГОСТе 27893-88 ничего не сказано об используемой воде, о ее качестве, происхождении и температуре.

Более адаптированным в этом отношении является национальный стандарт США UL 1581 «Reference Standard for Electrical Wires, Cables, and Flexible Cords» [6], используемый в Америке, Европе и ряде других стран. По требованиям стандарта UL 1581 для измерения емкости изоляции провода используется водопроводная вода разной температуры $(30,0 \pm 1,0)^\circ\text{C}$, $(75,0 \pm 1,0)^\circ\text{C}$ и $(90,0 \pm 1,0)^\circ\text{C}$. Температура изоляции провода также должна иметь различную температуру: для первого случая – 60°C , для второго – 75°C , для третьего – 90°C . Данные условия проведения контроля несколько приближены к условиям технологического процесса изготовления провода (см. п. 1.4). Недостатком стандарта UL 1581 является спорное усреднение результата измерения емкости при различных температурах используемой воды.

1.3.2 Влияние на результат измерения емкости провода по ГОСТ 27893-88 свойств воды, выполняющей функции измерительного электрода, и температурных условий измерения

При реализации описанного в ГОСТе 27893-88 метода измерения емкости провода вода обеспечивает электрический контакт между поверхностью изоляции провода и измерительным электродом, т.е. вода является электродом.

Вода представляет собой водный электропроводящий раствор, имеющих в ней солей, кислот и оснований, и, естественно, обладает некоторой электропроводностью. Электропроводность раствора пропорциональна в основном количеству находящихся в нем ионов и, следовательно, концентрации растворенных веществ [41-42]. Минеральную часть воды в основном составляют ионы K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} . Прочие ионы, например, Al^{3+} , Fe^{3+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} , $H_2PO_4^-$, NO_3^- , HPO_4^{2-} при незначительном их содержании в воде существенного влияния на электропроводность не оказывают [43].

Значение электропроводности воды позволяет судить об уровне ее минерализации. В зависимости от степени минерализации вода подразделяется на следующие типы:

- пресная вода – минерализация до 1 г/л;
- солоноватая вода – минерализация до 10 г/л;
- соленая вода – минерализация до 50 г/л;
- рассол – минерализация более 50 г/л [44] .

Удельная электропроводность составляет примерно следующие значения для:

- чистой воды – 0,055 мкСм/см [42];
- дистиллированной воды – 0,5 мкСм/см [45];
- атмосферных осадков – 5-30 мкСм/см;
- пресных речных и озерных вод – 20-800 мкСм/см;

- подземная вода, годная для питья – 30-2000 мкСм/см [46];
- океаническая — 45000-55000 мкСм/см [47-49].

Электропроводность растворов различных солей неодинакова. Например, воды, содержащие бикарбонат и сульфат кальция, обычно имеют самую низкую проводимость, а воды, содержащие хлорид натрия, обладают наибольшей проводимостью [47].

Электропроводность раствора по мере увеличения концентрации растворенных в нем веществ возрастает. В [41-42] приведены эмпирические зависимости удельной электропроводности водных растворов различных солей (NaCl, KCl, Na₂SO₄, NaHSO₃) от их концентрации при температуре 25 °С. Анализ зависимостей показывает, что при изменении концентрации различных солей от 1 до 5 г/л удельная электропроводность изменяется в пределах от 1500 до 9000 мкСм/см.

Следует отметить, что одной из наиболее распространенных примесей, растворенных в технической воде, является поваренная соль NaCl. Электропроводность раствора этой соли при одинаковой концентрации имеет более высокое значение по сравнению с другими распространенными примесями (солями KCl, Na₂SO₄, NaHSO₃) [41-42]. Концентрация соли NaCl в 1 мг/л обеспечивает электропроводность в 1,9 мкСм/см. Зависимость между электрической проводимостью воды и концентрацией в ней NaCl близка к прямой.

Как уже отмечалось [41-42, 44-45, 47] вода различного происхождения может сильно отличаться по составу растворенных в ней веществ, и, соответственно, иметь разную удельную электропроводность, что может достаточно сильно исказить результат измерения емкости провода.

Применение для реализации измерения емкости водопроводной питьевой воды не решает этой проблемы, так как в СанПиНе 2.1.4.1074-01 «Вода питьевая. Гигиенические требования...» [50], регламентирующем качество питьевой воды, определяется лишь верхняя граница минерализации воды. Для водопроводной воды минерализация не должна превышать 1 г/л,

причем содержание хлоридов не более 350 мг/л, а сульфатов – не более 500 мг/л. Подобная минерализация обеспечивает удельную электропроводность до 800 мкСм/см [41, 46].

При производстве кабелей и проводов допустимо использовать техническую воду для охлаждения изоляции после экструдирования. *Водой технической* называется вода, кроме питьевой, минеральной и промышленной, пригодная для использования в народном хозяйстве [46, 51]. Поскольку единого ГОСТа [51] на техническую воду не существует, то качество воды и степень ее минерализации может значительно отличаться на разных предприятиях.

Электрическая проводимость воды зависит не только от концентрации и состава растворенных в ней минеральных солей, но и от температуры воды. Температура оказывает два различных по характеру воздействия на электропроводность растворов: влияние вследствие изменения концентрации ионов и менее заметное влияние вследствие изменения подвижности ионов. При уменьшении концентрации примесей электропроводность в большей степени обуславливается изменением константы диссоциации воды, и температурный коэффициент раствора увеличивается. При электропроводности раствора более 1 мкСм/см собственной проводимостью воды можно пренебречь [42].

Удельная электропроводность теоретически чистой воды при температуре 25 °С равна 0,055 мкСм/см. Зависимость электропроводности чистой воды от температуры имеет ярко выраженный нелинейный характер, график которой приведен в [41-42]. В диапазоне изменения температуры от 0 до 100 °С удельная электропроводность чистой воды увеличивается от 0,01 до 0,7 мкСм/см.

Зависимость удельной электропроводности от температуры имеет вид

$$\sigma_t = \sigma_{25} [1 + \alpha_t (t - 25)], \quad (18)$$

где σ_t и σ_{25} – электрическая проводимость при температуре t и 25 °С, мкСм/см;

α_t – температурный коэффициент электрической проводимости растворенного вещества.

Температурные коэффициенты электрической проводимости α_t водного раствора NaCl при 25 °C равен 0,02 [41-42]. Следовательно, в соответствии с формулой (18) электропроводность раствора NaCl при увеличении температуры на 5 °C увеличивается на 10 %.

Кроме того, анализ графиков зависимости удельной электропроводности разбавленных растворов NaCl при различных температурах, приведенных в [41-42], показывает, что электропроводность раствора увеличивается при увеличении концентрации NaCl. При концентрации NaCl $\lambda = 1$ г/л изменение удельной электропроводности раствора при увеличении температуры от 25 °C на 5 °C составляет 10 %, при $\lambda = 4$ г/л – 16 %.

В ГОСТе 27893-88 не указано точное значение температуры воды, используемой для проведения испытаний. Предлагаемые условия проведения измерений могут варьироваться в достаточно широком диапазоне (температура воздуха от 15 до 35 °C [40]). При таком разбросе температуры электропроводность чистой воды ($\lambda \approx 0$) может меняться в пределах -50 % до +80 %, при концентрации соли NaCl $\lambda = 1$ г/л – в пределах -38 % до +72 %, при концентрации соли NaCl $\lambda = 4$ г/л – в пределах -28 % до +38 %. Подобные изменения удельной электропроводности воды могут значительно исказить результат измерения емкости провода. Важно, что при увеличении концентрации соли вклад в изменение удельной электропроводности раствора от изменения температуры уменьшается.

Итак, в ГОСТе 27893-88 «Кабели связи. Методы испытаний», единственном регламентирующем порядок проведения контроля емкости провода документе, не прописаны требования к воде, ее составу и температуре. Поэтому необходимо провести дополнительные исследования для определения условий, при которых следует проводить измерения в

соответствии с требованиями ГОСТа 27893-88 для получения значения емкости образца, которое можно принимать в качестве действительного при настройке и калибровке измерителя емкости. В приложении А приведено описание эксперимента по оценки степени влияния изменения параметров воды на результат измерения емкости и предложены рекомендации о конкретных параметрах условий проведения измерений емкости проводов, результаты которых могут быть использованы в качестве действительных при проведении настроек и калибровок измерителей емкости.

Анализ результатов проведенного эксперимента показал, что для различных материалов изоляции проводов существует разная зависимость изменения емкости провода при увеличении температуры воды, для поливинилхлорида существенно увеличивается измеренное значение емкости провода при увеличении температуры воды 0 до 100 °С, для полиэтилена незначительно уменьшается.

Таким образом, действительное значение емкости провода является таковым только в узком диапазоне изменения температуры воды, ее состава, концентрации примесей, а также при фиксированной температуре изоляции провода. Это следует учитывать при проведении калибровки и настройки измерителей емкости провода.

Для использования образцов провода в условиях технологического процесса необходимо определить значение емкости образцов провода при использовании различной температуры воды, характерной для технологического процесса изготовления провода, по методике, рекомендуемой ГОСТом, и внести эти результаты в паспорт для каждого образца провода. В дальнейшем эти результаты могут быть использованы в качестве действительных значений при проведении «рабочей» настройки и калибровки измерителя емкости в условиях технологического процесса при строгом соблюдении температуры проведения измерений.

1.4 Технологический контроль емкости электрического провода

Выходной контроль емкости проводится на отрезке уже готового провода. Поэтому результат контроля становится известен после завершения производства. Отклонение погонной емкости от требований стандартов приводит к браковке всей бухты провода. Кроме того, заключение о годности всего провода выносится по значению емкости для одного или нескольких отрезков этого провода, что не дает гарантии постоянства и соответствия требованиям стандартов и технических условий погонной емкости всего провода. Обнаружение брака на стадии выходного контроля приводит к большим экономическим затратам, снизить которые можно при проведении технологического контроля.

Непрерывный технологический контроль позволит контролировать емкость по всей длине провода, оперативно обнаруживать отклонения емкости провода от требований стандартов (или ТУ), выявлять локальные дефекты различного рода, такие как трещины, поры, локальное утонение/утолщение внешнего диаметра изоляции, инородные включения в изоляции. Своевременное обнаружение отклонений в технологическом процессе поможет вовремя внести необходимые коррективы и, следовательно, снизить издержки производства и повысить энергоэффективность кабельного предприятия [15-16].

Погонная емкость является одной из основных нормируемых величин, определяющих качество кабельного изделия. Известно, что емкость провода в значительной степени зависит от его геометрических размеров и электрических свойств изоляции. Поэтому изменение емкости может свидетельствовать об отклонении каких-либо геометрических параметров провода или электрических характеристик изоляции. Кроме того, резкое изменение емкости является показателем наличия несплошностей в изоляции (трещин, порезов, инородных включений и т.д.), так как при этом наблюдается резкое, скачкообразное изменение геометрических параметров

провода и электрических характеристик изоляции [2, 13-14]. Таким образом, при контроле емкости можно контролировать постоянство геометрических и электрических параметров провода.

Контролировать какой-либо параметр необходимо сразу же после проведения технологической операции по его формированию. Емкость провода обуславливается характеристиками технологического процесса нанесения изоляции на токопроводящую жилу, поэтому контроль емкости целесообразно проводить в процессе экструзии. [15].

Процесс наложения изоляции на токопроводящую жилу методом экструзии происходит при достаточно высокой температуре, значение которой в зависимости от используемого материала изоляции может достигать 280 °С [52, 54, 56].

В кабельной промышленности для изготовления изоляции провода используются классические термопласты различной рецептуры (поливинилхлоридные пластикаты, полистиролы, фторопласты, полиолефины) и термопластичные эластомеры. В кабельной отрасли России и стран СНГ наиболее распространенными для изготовления изоляции для кабельных изделий является ПВХ-пластикаты, за ними следуют полиэтиленовые компаунды: полиэтилен низкой плотности, полиэтилена высокой плотности и сшиваемый полиэтилен [57].

Так как температура изоляции, например из полихлорвинила, может оказать существенное влияние на результат измерения емкости провода (см. приложение А), то при измерении емкости необходимо учитывать температурные режимы процесса охлаждения изоляции [52, 54, 56].

Температуры, при которых полимерные покрытия не деформируются, зависят от материала изоляции: для полиэтилена низкой плотности – (60...80) °С, для ПВХ пластиката – (60...90) °С, для фторопласта – (110...200) °С. В реальных условиях производства изоляция провода охлаждается до (40...50) °С, что необходимо исходя из требований безопасности [37, 56].

Из-за склонности полиэтиленовой изоляции к образованию пустот при резком охлаждении следует проводить ее ступенчато. Чаще всего для этого используется трехсекционная охлаждающая ванна. Температура воды в первой секции составляет (80...90) °С, во второй – (50...70) °С, а в третьей секции используется холодная водопроводная вода. Если толщина изоляции мала (менее 0,7 мм), то его можно охлаждать холодной водопроводной водой. Для изоляции из ПВХ пластиката также допускается охлаждение в водопроводной воде. Изоляция из фторопластов толщиной (0,5...0,8) мм сначала охлаждается в воздушной среде, а потом помещается в охлаждающую ванну, либо вода вообще не применяется для охлаждения [37, 56].

1.4.1 Выбор измерительного преобразователя, применимого для технологического контроля емкости провода

При выборе конструкции измерительного преобразователя для измерения емкости в технологическом процессе изготовления провода следует учитывать ряд особенностей:

- провод относится к длинномерным изделиям;
- при производстве провод постоянно движется с достаточно высокой скоростью, иногда до 2000 м/мин [52, 54, 56];
- на стадии нанесения изоляции на токопроводящую жилу провод не имеет второго электрода, в качестве которой у готового кабеля (провода) может быть экран, металлическая оболочка или жила второго провода.

Одножильный провод при центральном расположении токопроводящей жилы можно рассматривать как цилиндрический конденсатор, одной обкладкой которого служит токопроводящая жила, а другой – металлический элемент готового кабеля (провода). Емкость такого конденсатора можно рассчитать по формуле (2).

Для упрощения расчётов возможен ряд допущений, которые незначительно повлияют на точность измерения емкости:

- пренебречь наличием неровности поверхности многопроволочной токопроводящей жилы;
- не учитывать некоторую овальность поверхности изоляции, возникающую при изготовлении провода.

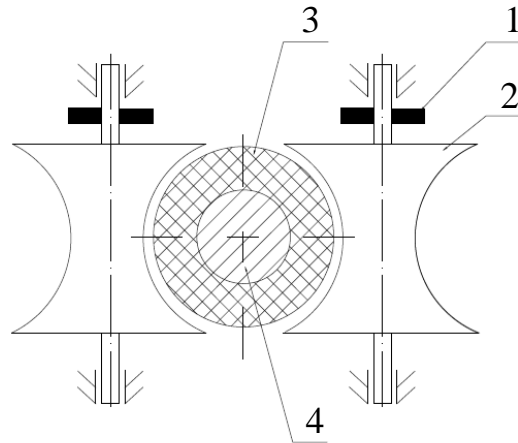
Изделия с некруговым сечением жилы, например изделия, имеющие секторную жилу, в этом случае не рассматриваются.

Для своевременного контроля и качественного регулирования производственного процесса измерения емкости стоит производить сразу же на выходе из экструдера. Но на данной стадии производства провод не имеет второго электрода, поэтому для проведения измерения у провода необходимо сформировать второй электрод. Вариант формирования второго электрода цилиндрического конденсатора определяет конструкцию измерительного преобразователя. Возможные конструкции измерительных преобразователей, применяемые для измерения емкости электрического провода, условно можно разделить на контактные, бесконтактные и жидкостные.

Рассмотрим названные конструкции преобразователей.

Контактный измерительный преобразователь

Второй электрод можно реализовать в виде обжимных вращающихся роликов. Число этих роликов выбирается исходя из диаметра контролируемого провода для обеспечения полного обхвата провода по всей длине окружности его изоляции. Предложенный метод представлен на рисунке 8.

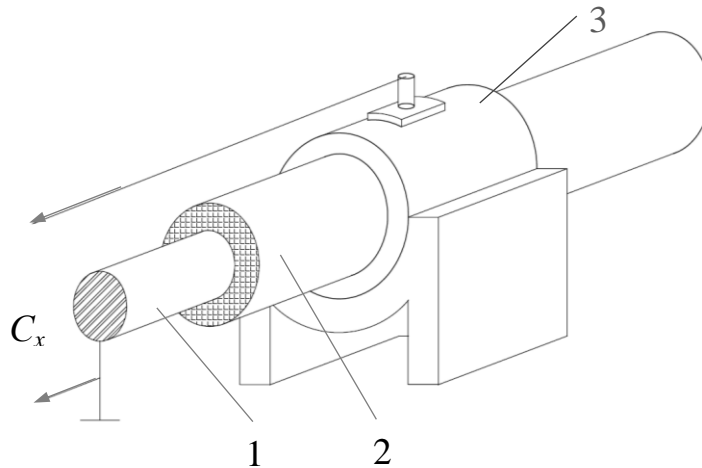


1 – токосъемник; 2 – вращающиеся ролики-контакты; 3 – изоляция провода;
4 – жила провода

Рисунок 8 – Электрод в виде обжимных роликов

Данный способ достаточно прост в реализации, но при этом возникает довольно значительная погрешность измерения за счет наличия неплотного контакта между изоляцией провода и электродами (по причине шероховатости поверхности изоляции).

Поскольку для уменьшения погрешности измерения емкости второй электрод должен иметь плотный контакт с изоляцией провода, целесообразно сформировать его в виде полого, проводящего ток, цилиндра, диаметр которого равен наружному диаметру изоляции провода. Реализация контактного измерительного преобразователя в виде полого цилиндра представлена на рисунке 9. В этом случае в конструкции отсутствуют подвижные элементы, что значительно увеличивает точность измерения емкости.



1 - жила провода, 2 - изоляция провода, 3 – электрод в виде полого цилиндра

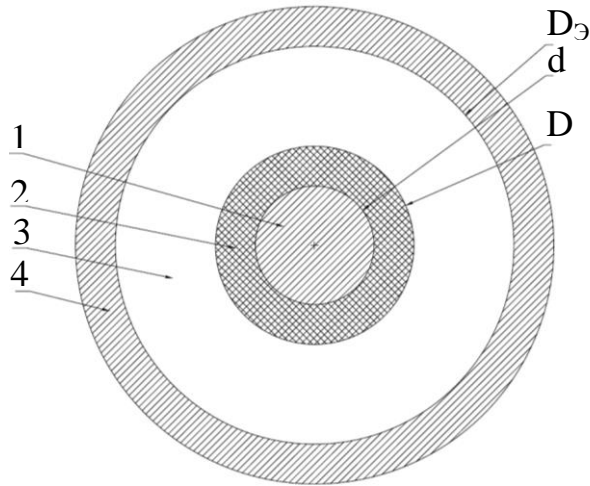
Рисунок 9 – Измерительный преобразователь в виде полого цилиндра

Отметим, что на выходе из экструдера поверхность изоляции еще мягкая, вязкая. Даже при незначительном прикосновении, давлении возможна деформация изоляции, что приводит к образованию дефекта и, как следствие, изменению емкости провода, а контактные измерительные преобразователи для обеспечения точности измерения должны иметь достаточно плотный контакт с только что нанесенной изоляцией. Поэтому использование контактных преобразователей может привести к деформации изоляции, а высокая скорость движения провода усугубляет ситуацию. Поэтому использование контактных преобразователей при контроле емкости сразу после нанесения изоляции нежелательно.

Бесконтактные измерительные преобразователи

Чтобы избежать непосредственного контакта, а значит деформации незатвердевшей изоляции провода, можно использовать бесконтактные измерительные преобразователи. Для этого измерительный преобразователь формируется в виде цилиндрического трубчатого электрода, описанного выше (рисунок 9), но заведомо большего диаметра, чем диаметр изолированного провода. В этом случае провод с мягкой изоляцией свободно перемещается внутри измерительного электрода, не соприкасаясь с его

стенками. При соосном размещении провода и электрода конструкция представляет собой цилиндрический конденсатор с двухслойной изоляцией – воздухом и изоляцией провода (рисунок 10) [58].



1 – жила провод, 2 – изоляция провода, 3 – воздушный промежуток, 4 – трубчатый электрод

Рисунок 10 – Расположение провода внутри трубчатого электрода

Емкость конденсатора C , Φ , представленного на рисунке 10, определяется формулой:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_{uz}\epsilon_0 l}{\epsilon_{uz} \ln\left(\frac{D_{\text{э}}}{D}\right) + \ln\left(\frac{D}{d}\right)}, \quad (19)$$

где ϵ_{uz} – диэлектрическая проницаемость изоляционного материала;

ϵ_0 – относительная диэлектрическая проницаемость, $\Phi/\text{м}$;

l – длина зоны контроля, м;

$D_{\text{э}}$ – внутренний диаметр электрода, мм;

D – диаметр изоляции, мм;

d – диаметр жилы, мм.

В результате контроля измеряется емкость описанного конденсатора, зная геометрические размеры которого, можно вычислить искомую емкость провода [59].

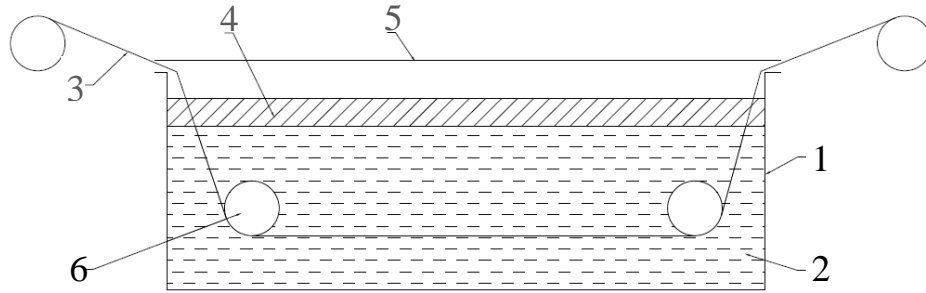
Формула (19) справедлива только при соосном расположении жилы и измерительного преобразователя. Во время контроля провод движется с

достаточно большой скоростью, поэтому избежать вибрации практически невозможно. Вибрация приводит к постоянному отклонению центра провода от оси измерительного электрода, что вызывает погрешность измерения емкости. Недостаток данного метода состоит в том, что постоянно необходимо обеспечивать соосность расположения жилы провода и измерительного преобразователя.

Измерительные преобразователи с использованием жидкостного электрода

Промежуточным вариантом между контактными и бесконтактными измерительными преобразователями является жидкостный датчик. Для этого в качестве электрода, соприкасающегося с наружной поверхностью изоляции провода, используется токопроводящая жидкость. Жидкость не оказывает сильного давления на поверхность изоляции. Трение между жидкостью и изоляцией значительно меньше, чем в случае использования контактных электродов.

На рисунке 11 приведена схема жидкостного датчика. Датчик представляет собой латунную ванну 1, в которую наливается электропроводящая жидкость 2, например, ртуть. Для измерения емкости контролируемый провод 3 пропускается через ванну, заполненную ртутью или другой токопроводящей жидкостью. Для устранения испарения из ванны поверхность ртути заливается слоем спирта 4 или другого жидкого диэлектрика. Ванна закрывается крышкой 5. Контролируемый провод проходит через ртуть по роликам 6.



1 – ванна, 2 – электропроводящая жидкость, 3 – контролируемый провод,
4 – слой диэлектрика, 5 – крышка, 6 – ролики

Рисунок 11 – Жидкостный датчик

К недостаткам жидкостного ртутного датчика следует отнести сложность устройства, значительные неудобства при эксплуатации измерительного преобразователя из-за токсичности ртути, а также повышенные требования к технике безопасности [60].

Для устранения необходимости соосного расположения контролируемого провода и трубчатого электрода (рисунок 10) можно пространство между поверхностью изоляции и внутренней поверхностью электрода заполнить проводящей жидкостью. Как было рассмотрено выше применение для данных целей ртути нежелательно.

Наиболее подходящим веществом для решения этой задачи является вода. Так как вода за счет растворенных в ней кислот, солей и оснований является электролитом, то она обеспечивает электрический контакт между электродом и внешней поверхностью изоляции провода. Кроме того в технологическом процессе производства провода уже задействована вода, которая используется для охлаждения нагретого во время нанесения изоляции провода.

Этот метод наиболее приемлем, так как нет необходимости вводить дополнительные вещества в технологический процесс, вода есть при любом производстве кабельных изделий. Охлаждающая ванна, заполненная водой, располагается рядом с экструдером. С выхода экструдера производимый провод сразу же попадает в воду охлаждающей ванны, что обеспечивает

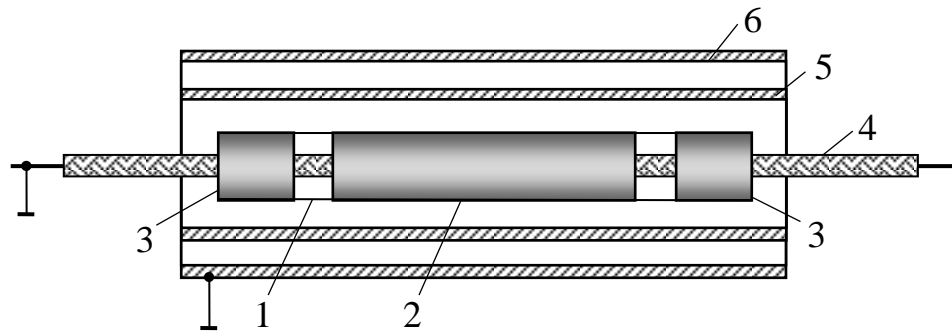
требование своевременности контроля. Вода нетоксична и при ее использовании нет жестких требований к обеспечению соосности расположения контролируемого провода и измерительного электрода [58].

1.4.2 Реализации измерительного преобразователя емкости провода на основе трубчатого электрода

В предыдущем разделе приведено обоснование использования измерительного преобразователя в виде трубчатого измерительного электрода. В этом разделе дается патентный обзор возможных способов его реализации.

Для устранения растекания электрического поля на краях измерительного электрода предлагается ввести в конструкцию измерительного преобразователя дополнительные электроды, которые располагаются по краям измерительного электрода и призваны повысить однородность поля внутри измерительного электрода, что обеспечивает минимизацию методической погрешности измерения емкости провода. Роберт Аббе предложил конструкцию преобразователя с использованием дополнительных электродов [61], представленную на рисунке 12.

Для уменьшения влияния паразитной емкости окружающей среды на результат измерения емкости провода нужно уменьшать диаметр измерительного электрода. Но подобное решение повышает требования к соосности расположения контролируемого провода и измерительного преобразователя.



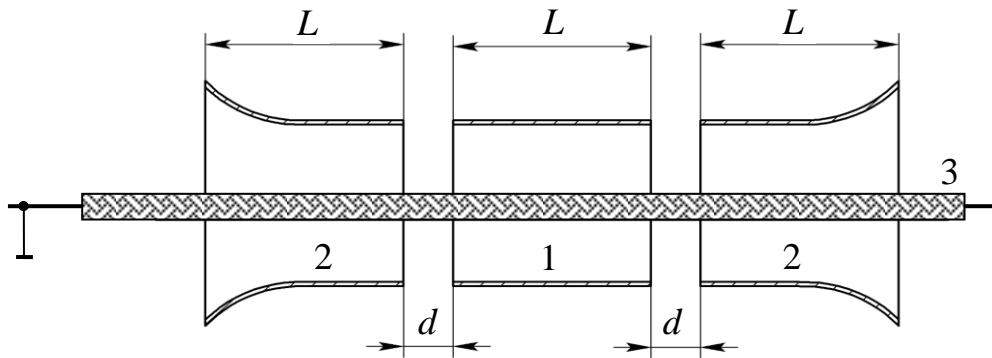
1 – трубка из непроводящего материала, 2 – измерительный электрод,
3 – дополнительные электроды, 4 – контролируемый провод, 5 – проводящий щит,
6 – заземленный экран

Рисунок 12 – Датчик для измерения емкости провода

Для предотвращения контакта контролируемого провода 4 с измерительным электродом используется трубка из непроводящего материала 1, предпочтительно, из кварца, на внешнюю поверхность которой напыляются измерительный 2 и дополнительные электроды 3, устраняющие краевой эффект внутри зоны измерения емкости. Электроды отделены от окружающего пространства электропроводящим щитом 5, подключенным к источнику питания, и защитным заземленным экраном 6, которые уменьшают влияние паразитной емкости на результат измерения емкости [61].

Другим вариантом устранения влияния краевого эффекта при измерении емкости является запатентованная Мартином Рихтером конструкция [62], представленная на рисунке 13.

Измерительный преобразователь состоит из трех электродов, каждый из которых образует с токопроводящей жилой цилиндрический конденсатор. Измеренные значения емкости каждым конденсатором фиксируются и сравниваются между собой. В случае отличия измеренных значений емкости фиксируется наличие дефекта. Особенность конструкции заключается в специальной форме крайних электродов, позволяющих скомпенсировать растекание поля на краях конденсаторов.

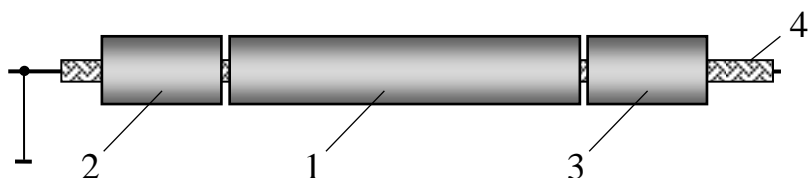


1 – измерительный электрод, 2 – дополнительные электроды,
3 – контролируемый провод

Рисунок 13 – Устройство для бесконтактной проверки изоляции изолированных электрических проводов

Оба описанных измерительных преобразователя [61-62] чувствительны к отклонению провода от центра измерительного электрода. Для устранения этого недостатка внутреннее пространство трубчатого электрода необходимо заполнять токопроводящей жидкостью, обеспечивающей электрический контакт между поверхностью изоляции провода и внутренней поверхностью электрода. Наиболее подходящим для постоянного контроля емкости провода в процессе его производства является измерительный преобразователь в виде трубчатого электрода, погруженного в проводящую жидкость, в качестве которой используется вода охлаждающей ванны.

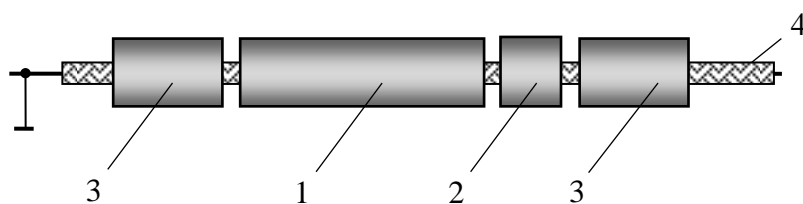
Подобная конструкция измерительного преобразователя с использованием жидкостного трубчатого электрода запатентована Патриком Флемингом и Ли Робертом Колеманом [63-64]. Система мониторинга емкости основана на использовании измерительного преобразователя (рисунок 14), состоящего из измерительного электрода 1 и двух дополнительных электродов 2 и 3, предназначенных для устранения растекания поля на краях измерительного электрода. Измерительный преобразователь вместе с контролируемым проводом 4 погружается в воду охлаждающей ванны экструзионной линии (на рисунке не изображено).



1 – измерительный электрод, 2,3 – дополнительные электроды,
4 – контролируемый провод

Рисунок 14 – Измерительный преобразователь для системы мониторинга емкости

Существует несколько модификаций данного измерительного преобразователя (рисунок 14). Одна из них, предложенная Харальдом Сикорой [65], позволяет не только измерять емкость контролируемого провода, но и контролировать локальное изменение емкости, т.е. обнаруживать микродефекты. Для этого (рисунок 15) используются два измерительных электрода 1, 2. Первый электрод аналогичный используемому в системе мониторинга емкости [63-64], позволяет определить среднюю емкость по длине измерительного электрода. Для определения емкости в локальной точке, необходимо иметь электрод нулевой длины, что физически получить невозможно, поэтому используется второй электрод малой длины. Для повышения точности локального измерения емкости второй электрод должен иметь минимальную длину: примерно 10-25 % от длины первого электрода.



1,2 – измерительные электроды, 3 – дополнительные электроды,
4 – контролируемый провод

Рисунок 15 – Измерительный преобразователь для локального измерения емкости провода

Приведенная конструкция является лишь модификацией основной конструкции (рисунок 14), позволяющей повысить точность измерения.

На основе вышесказанного можно сделать вывод, что метод реализации второго электрода с применением трубчатого электрода, заполненного водой охлаждающей ванны, является практически единственно возможным для контроля емкости в процессе производства одножильного изолированного провода. Данный метод реализован в приборах контроля емкости, выпускаемых ведущими в кабельном приборостроении зарубежными фирмами: Sikora, Zumbach, Proton Products [17-23].

Метод измерения емкости провода заключается в создании гармонического электрического поля между участком поверхности изоляции провода и заземленной электропроводящей жилой с помощью трубчатого измерительного преобразователя, помещенного в воду. Значение силы тока, протекающего через измерительный электрод, при известных амплитуде и частоте приложенного к электродам гармонического напряжения определяет значение емкости провода. Контроль осуществляют непосредственно в технологическом процессе изготовления электрических проводов на стадии нанесения на электропроводящую жилу изоляционной оболочки методом экструзии. Измерительный преобразователь с участком контролируемого провода погружается в воду охлаждающей ванны экструзионной линии. Таким образом, в процессе контроля измеряется емкость цилиндрического конденсатора, одной из обкладок которого является электропроводящая жила провода, а другой – вода, окружающая его изоляционную оболочку и находящаяся в электрическом контакте с трубчатым электродом, через который непрерывно движется контролируемый провод [66-67].

Несмотря на то, что подобный метод широко используется зарубежными фирмами [17-23], доступной информации об особенностях его реализации, конструкции и конструктивных параметрах измерительного преобразователя, о наличии и степени влияния мешающих факторов при измерении емкости в научной литературе не обнаружено, что подтверждает значимость настоящего исследования.

1.5 Выводы по главе 1

1. Выполнен обзор существующих методов измерения емкости. Для осуществления контроля емкости провода в процессе его производства выбран наиболее простой и легко реализуемый метод амперметра-вольтметра, основанный на измерении тока, протекающего в цепи измерительного электрода, по значению которого при известных амплитуде и частоте приложенного гармонического напряжения можно судить о значении емкости одножильного электрического провода. Данный метод обладает высокой точностью, помехозащищённостью, быстродействием, а также характеризуется линейной функцией преобразования.

2. Из многообразия вариантов реализации измерительного преобразователя, позволяющего проводить контроль емкости провода при его производстве на стадии нанесения изоляции, выбран единственно возможный метод измерения, основанный на использовании трубчатого электрода, погруженного в токопроводящую жидкость. В качестве жидкости используется вода охлаждающей ванны экструзионной линии, в которую погружен преобразователь вместе с постоянно движущимся внутри него контролируемым проводом. Значение емкости провода определяется по значению силы тока, протекающего через измерительный трубчатый электрод, при известных амплитуде и частоте приложенного к электроду гармонического напряжения.

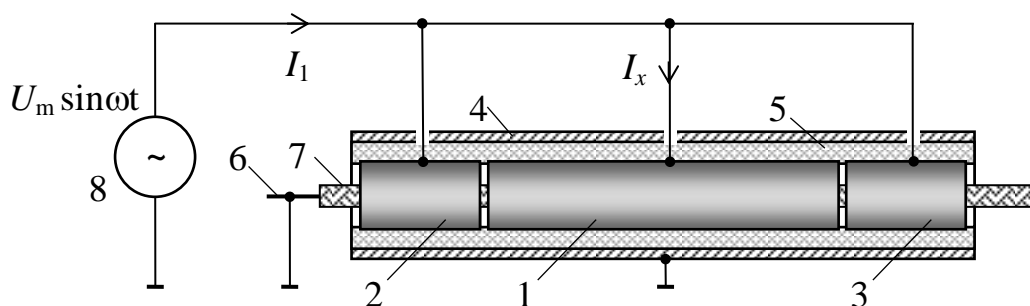
3. Рассмотрены стандарты на проведение измерения емкости провода в кабельной промышленности. Выяснено, что существуют нормативные документы, регламентирующие порядок только выходного контроля. Выявлены недостатки этих документов в части отсутствия требований к качеству воды, играющей роль измерительного электрода при проведении измерения емкости провода.

4. Проведен анализ влияния свойств воды на результат контроля, который показал, что изменение температуры, состава и концентрации

примеси в водном растворе приводят к существенному влиянию на результат измерения емкости провода вследствие значительного изменения удельной электропроводности воды. Было отмечено, что при увеличении температуры воды для ряда материалов изоляции провода (например, для поливинилхлорида) происходит значительное изменение диэлектрической проницаемости, что также оказывает существенное влияние на результат измерения емкости. Из этого следует, что для определения действительного значения емкости образца провода необходимо проводить измерение в строго определенных условиях, параметры которых рекомендуется внести в новую редакцию ГОСТа, регламентирующего методику измерения емкости проводов при проведении испытаний кабельных изделий.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРОЕМКОСТНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПОГОННОЙ ЕМКОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОВОДА

Конструкция электроемкостного измерительного преобразователя (ЭЕИП), используемого для реализации выбранного метода измерения емкости провода, схематично представлена на рисунке 16. Преобразователь состоит из измерительного 1 и двух дополнительных 2 и 3 трубчатых электродов, размещенных в металлическом корпусе 4, изолированном от электродов изоляционным материалом 5. Контролируемый электрический провод, имеющий электропроводящую жилу 6 и изоляционную оболочку 7, непрерывно движется внутри электродов измерительного преобразователя. Электроды преобразователя подключаются к генератору 8 гармонического напряжения $U_m \sin \omega t$ с известными амплитудой U_m , В и частотой ω , Гц.



1 – измерительный электрод; 2,3 – дополнительные электроды; 4 – корпус преобразователя; 5 – изолятор; 6 – токопроводящая жила; 7 – изоляция провода; 8 – генератор

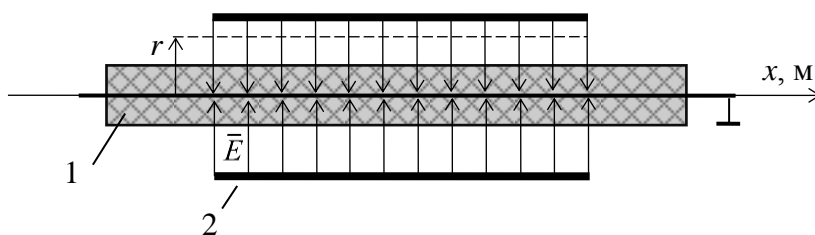
Рисунок 16 – Конструкция электроемкостного измерительного преобразователя

Измерительный преобразователь и провод погружаются в воду охлаждающей ванны (на рисунке не показана). Электропроводящая жила провода 6 и корпус преобразователя 4 соединены с общим проводом (металлическим корпусом охлаждающей ванны) [66-67].

2.1 Требования к конструкции электроемкостного измерительного преобразователя

Для обеспечения максимальной достоверности контроля емкости провода необходимо подобрать оптимальные значения конструктивных параметров ЭЕИП. К основным конструктивным параметрам измерительного преобразователя относятся внутренний диаметр трубчатых электродов, длина измерительного и дополнительных электродов, расстояние (зазор) между измерительным и дополнительными электродами, внутренний диаметр цилиндрического корпуса преобразователя.

Оптимальной конструкцией ЭЕИП является такая, при которой обеспечивается наиболее высокая однородность в продольном (осевом) направлении электрического поля между внутренней поверхностью трубчатого измерительного электрода и проводящей жилой контролируемого электрического провода (рисунок 17). Только в этом случае обеспечивается минимальная зависимость функции преобразования емкости электрического провода в выходной сигнал ЭЕИП от геометрических размеров провода, электрических свойств изоляции и изменения электропроводности воды [68-71].



1 – провод; 2 – измерительный электрод

Рисунок 17 – Поле внутри измерительного преобразователя

Признаками однородности электрического поля являются одинаковость значений радиальной составляющей E_r , В/м, вектора напряженности электрического поля \vec{E} и равенство нулю продольной составляющей E_x , В/м (направленной вдоль оси провода x) при любом

фиксированном значении радиуса r внутри измерительного электрода (рисунок 17).

В качестве критерия продольной однородности электрического поля внутри измерительного электрода удобно использовать величину β , равную отношению значений погонной емкости C_n , пФ/м, между электродом и проводящей жилой провода на участках по всей длине измерительного электрода и погонной емкости C_0 , пФ/м, на участке в центральной части электрода (где электрическое поле является заведомо однородным в продольном направлении):

$$\beta = \frac{C_n}{C_0}. \quad (20)$$

Значение величины β при оптимальных значениях конструктивных параметров стремится к единице. Во всех анализируемых случаях в качестве участка с однородным полем рассматривается центральная часть измерительного электрода, длина которой равна половине его общей длины. В качестве участка измерительного электрода, для которого оценивается однородность электрического поля в продольном направлении, рассматривается оставшая часть измерительного электрода.

Для обеспечения продольной однородности поля внутри измерительного электрода внутренний диаметр трубчатых электродов должен быть минимальным. Однако производственные условия требуют, чтобы контролируемый провод свободно перемещался внутри ЭИП, поэтому внутренний диаметр трубчатых (измерительного и дополнительных) электродов должен быть как минимум в 2 раза больше наружного диаметра изоляции провода.

Чем длиннее измерительный электрод, тем меньшее влияние будет оказывать неоднородность поля в продольном направлении на краях измерительного электрода. Но в этом случае возрастает продольный габаритный размер преобразователя. Кроме того при большой длине электрода не обеспечивается требуемая локальность контроля, для

достижения которой наоборот рекомендуется использовать измерительный электрод минимальной длины [63-64]. Компромиссным размером является длина измерительного электрода порядка (200...300) мм.

Начальное значение емкости ЭЕИП без объекта контроля определяется внутренним диаметром цилиндрического корпуса. Для минимизации начальной емкости измерительного преобразователя внутренней диаметр корпуса необходимо увеличивать, а изоляционный материал между металлическим корпусом и измерительным электродом должен обладать минимальной диэлектрической проницаемостью. Поэтому из соображений минимизации начальной емкости измерительного преобразователя внутренний диаметр корпуса выбирается, по крайней мере, в два раза превышающим наружный диаметр трубчатых электродов, а в качестве изолятора используют воздушный зазор.

2.2 Определение оптимальных параметров измерительного преобразователя на основе компьютерного моделирование

Оптимальные значения остальных конструктивных параметров получены путем моделирования взаимодействия электрического поля электроемкостного измерительного преобразователя с электрическим проводом. Компьютерная модель создана в среде COMSOL Multiphysics 3.5a.

Для создания 3D модели преобразователя в среде моделирования использовался физический AC/DC модуль раздела QuasiStatics Electric (3D) стандартной библиотеки.

Построение геометрии создаваемой модели (рисунок 18) осуществлялось в разделе Draw. В качестве фиксированных геометрических параметров модели взяты следующие: диаметр токопроводящей жилы провода – 2 мм; диаметр изоляционной оболочки провода – 6 мм; длина измерительного электрода – 200 мм; внутренний диаметр электродов –

20 мм; внутренний диаметр корпуса – 40 мм; толщина стенок электродов и корпуса – 1 мм.

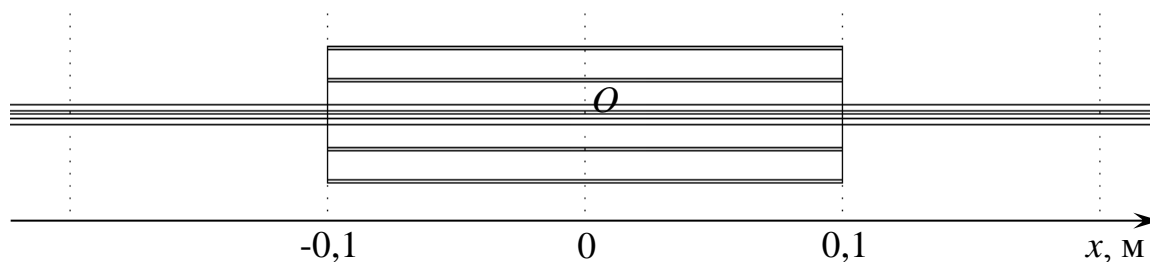


Рисунок 18 – Геометрия измерительного преобразователя в среде COMSOL Multiphysics 3.5a

Раздел Physics (меню «Subdomain Settings») позволяет задавать электрические свойства материалов элементов математической модели. Для жилы задавался материал – медь, для электродов и корпуса – сталь, для изоляции провода – полиэтилен низкого давления из стандартной библиотеки материалов. При моделировании задавались два варианта электрических свойств воды: вода дистиллированная (удельная электропроводность – $\sigma = 0,5 \cdot 10^{-4}$ См/м) и вода соленая ($\sigma = 0,8$ См/м).

Граничные условия решения задачи устанавливались в меню «Boundary Settings». Амплитуда потенциала электродов – 5 В, частота поля – 10 кГц.

Последним этапом, предшествующим расчетам, является наложение сетки, от густоты которой напрямую зависит точность результата вычисления. Мелкая сетка во всем объеме дает более точный результат вычислений, но при этом значительно увеличивается время расчета. Поэтому по всему объекту используется достаточно крупная сетка, а в областях повышенной напряженности поля и ее градиента размер сетки уменьшается (рисунок 19).

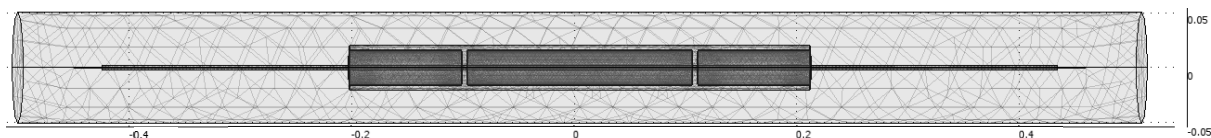


Рисунок 19 – Разбивка сетки для расчета модели преобразователя в среде COMSOL Multiphysics 3.5a

Для извлечения требуемых результатов после окончания расчетов использовался раздел «Postprocessing» с множеством функций для построения различных видов графиков.

Для определения значения электрической емкости C цилиндрического конденсатора (измерительного преобразователя) между измерительным электродом и проводящей жилой провода используется известное математическое выражение, определяющее энергию электрического поля заряженного конденсатора [72]

$$W = \frac{CU^2}{2}, \quad (21)$$

где U – разностью потенциалов на электродах конденсатора, В.

Среднее значение электрической энергии, запасенной в каком-либо конечном объеме пространства, определяется формулой [73]:

$$W = \int_V \frac{\overline{D\overline{E}}}{2} dV, \quad (22)$$

где D – индукция электрического поля, Кл/м²;

E – напряженность электрического поля, В/м;

V – объем, занимаемый электрическим полем, м³.

Из (21) и (22) легко получить удобное выражение для расчета значения емкости численным методом в среде COMSOL Multiphysics:

$$C = \frac{1}{U^2} \int_V \overline{D\overline{E}} dV. \quad (23)$$

Для нахождения емкости C_0 , пФ между электродом и проводящей жилой провода на участке с однородным полем в центральной части электрода интегрирование осуществляется по объему цилиндра, ограниченному внутренней поверхностью измерительного электрода и поперечными плоскостями с координатами $x = -0,05$ м и $x = 0,05$ м (рисунок 18).

Емкость C_n , пФ между электродом и проводящей жилой провода на участках с неоднородным полем по краям измерительного электрода в первом приближении может быть определена интегрированием по объему цилиндров, ограниченному внутренней поверхностью измерительного электрода и поперечными плоскостями с координатами $x = -0,1$ м и $x = 0,1$ м (рисунок 18). Начало координат O здесь и далее совпадает с центром преобразователя. Реально электрическое поле рассматриваемого цилиндрического конденсатора выходит за пределы интегрирования. Однако погрешность определения емкости C_n , пФ, обусловленная допущением, что электрическое поле сосредоточено только внутри измерительного электрода и не выходит за его габариты является существенной только для вариантов конструкции преобразователя, характеризуемых высокой неоднородностью поля в зоне измерения. Для оптимальных вариантов конструкции преобразователя, обеспечивающих однородное поле, эта погрешность становится пренебрежимо малой, а используемое допущение значительно упрощает решение задачи.

Результаты распределения электрических потенциалов при взаимодействии электрического поля преобразователя с электрическим проводом для случая отсутствия дополнительных электродов и использования дистиллированной воды, полученные с использованием компьютерного моделирования ЭИП в среде Comsol Multiphysics, показаны

эквипотенциальными линиями и цветовым спектром на рисунке 20.

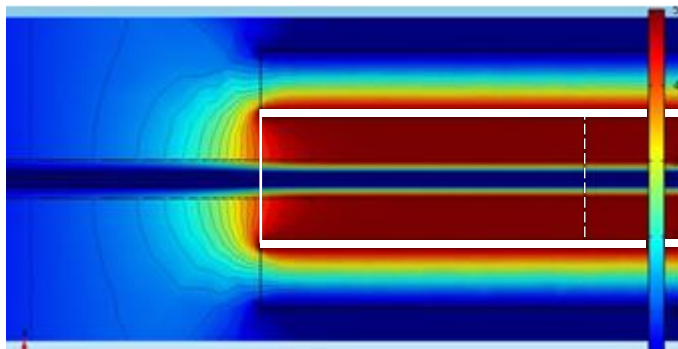


Рисунок 20 – Картина поля для ЭЕИП без дополнительных электродов (вода дистиллированная)

Распределение значений продольной E_x , В/м и радиальной E_r , В/м, пространственных составляющих вектора напряженности электрического поля преобразователя представлено на рисунке 21. Напряженность электрического поля определялась в средней части оболочки кабеля при значении радиуса вдвое превышающем радиус проводящей жилы (рисунок 21а) и вблизи внутренней поверхности измерительного электрода (рисунок 21б).

Анализ результатов моделирования, представленных на рисунках 20 и 21, показывает, что при отсутствии дополнительных электродов имеет место «выпучивание» электрического поля у краев электрода и, как следствие, высокая неоднородность поля в этих областях.

Для рассматриваемого случая ЭЕИП без дополнительных электродов в результате расчетов были получены значения по формуле (20):

$$C_0 = 1,259 \text{ пФ}; C_n = 1,499 \text{ пФ}; \beta = \frac{C_n}{C_0} = 1,19.$$

Таким образом, при заданных условиях степень неоднородности электрического поля в продольном (осевом) направлении, составляет приблизительно 20 %, что обуславливает наличие методической погрешности измерения погонной емкости того же порядка.

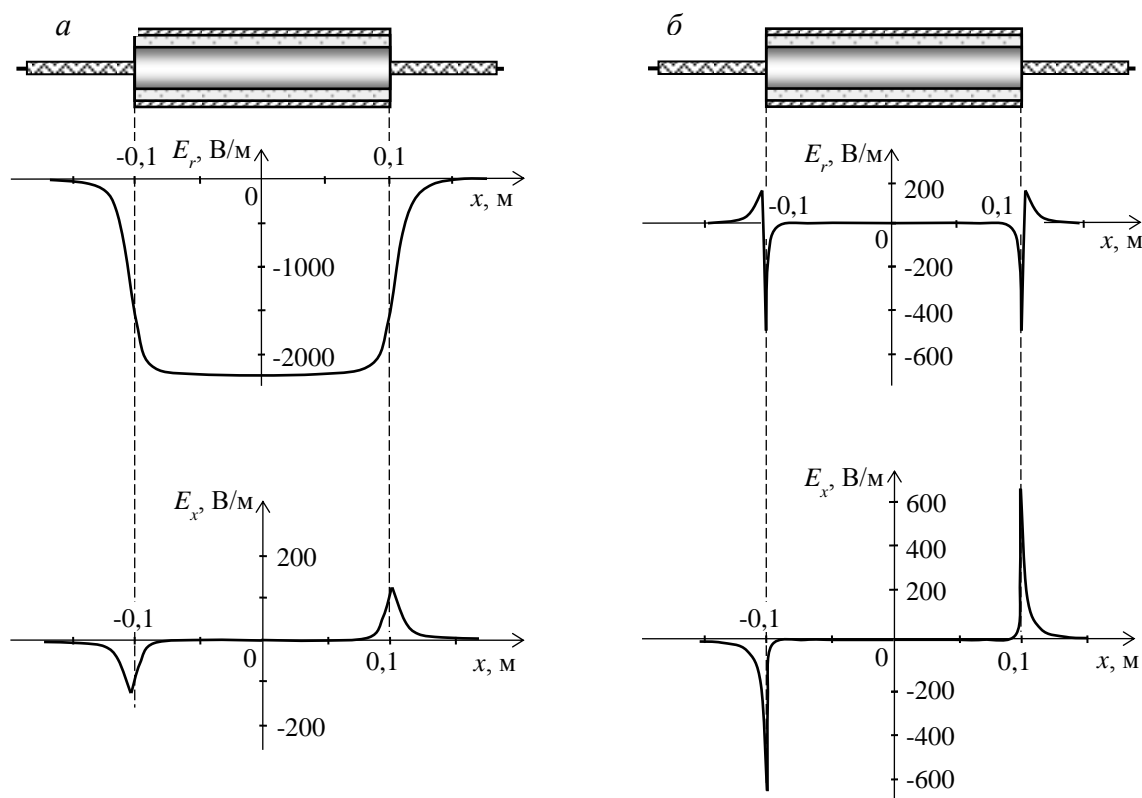


Рисунок 21 – Распределение радиальной E_r и продольной E_x составляющих напряженности электрического поля в средней части оболочки кабеля (а) и вблизи внутренней поверхности измерительного электрода (б) для ЭИП без дополнительных электродов

Использование вместо дистиллированной воды соленой качественно дает ту же картину поля и близкие количественные параметры (формула 20):

$$C_0 = 1,266 \text{ пФ}; \quad C_{\text{н}} = 1,499 \text{ пФ}; \quad \beta = \frac{C_{\text{н}}}{C_0} = 1,18.$$

Радикального повышения однородности электрического поля в продольном направлении по всей длине измерительного электрода можно добиться использованием дополнительных электродов.

На рисунке 22 показано распределение электрических потенциалов при взаимодействии электрического поля преобразователя с электрическим проводом при наличии дополнительных электродов и использования дистиллированной воды. Длина дополнительных электродов задавалась равной внутреннему радиусу измерительного электрода $R = 10 \text{ мм}$, расстояние между измерительным и дополнительным электродами – 1 мм.

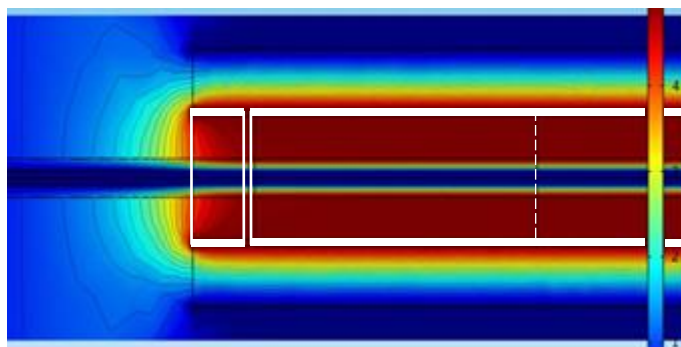


Рисунок 22 – Картина поля на краю измерительного преобразователя для ЭИИП с дополнительными электродами длиной $1R$ и зазоре 1 мм (вода дистиллированная)

На рисунке 23 показано распределение значений продольной E_x , В/м и радиальной E_r , В/м, пространственных составляющих вектора напряженности электрического поля преобразователя вдоль продольной оси.

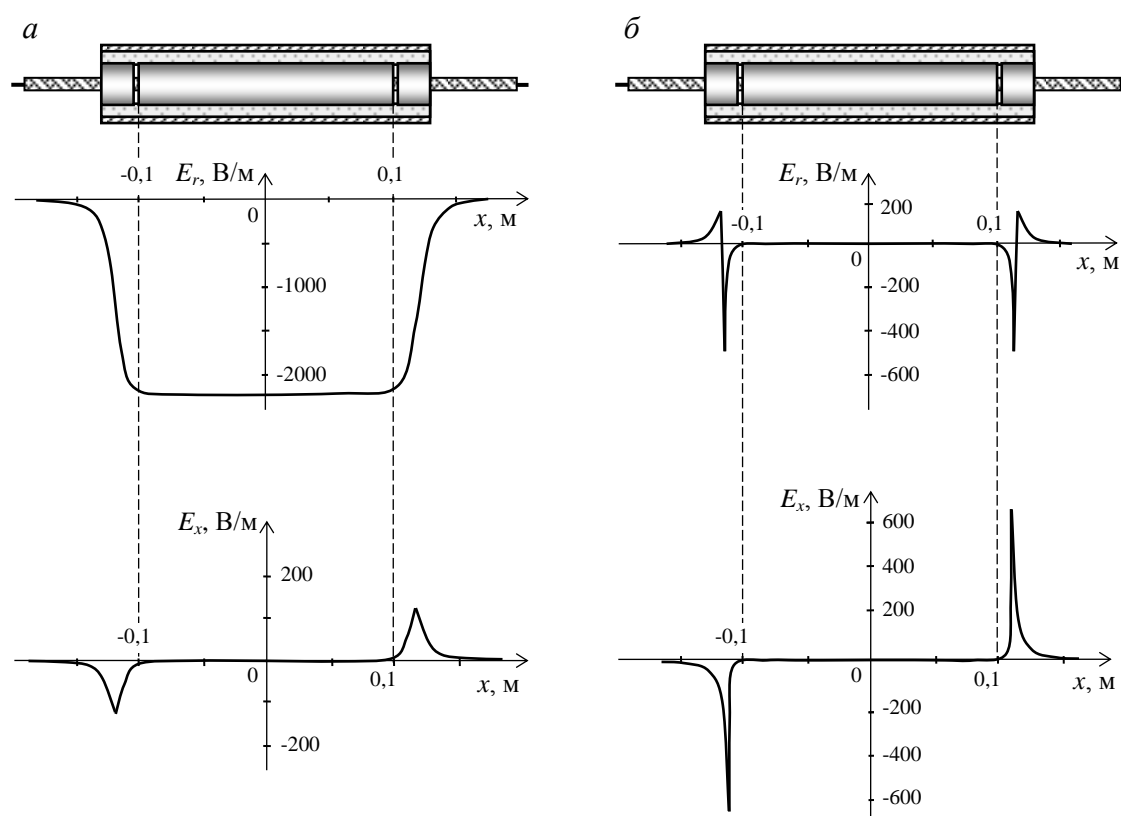


Рисунок 23 – Распределение радиальной E_r и продольной E_x составляющих напряженности электрического поля в средней части оболочки провода (а) и вблизи внутренней поверхности измерительного электрода (б) для ЭИИП с дополнительными электродами длиной $1R$ и зазоре 1 мм

Анализ результатов моделирования, показывает, что при наличии дополнительных электродов «выпучивание» электрического поля переносится в этом случае к дальним относительно измерительного электрода краям дополнительных электродов. По всей длине измерительного электрода наблюдается высокая однородность поля в продольном направлении. Значение величины β (формула 21) в этом случае равно 1, что соответствует оптимальному варианту конструкции.

С использованием разработанной компьютерной модели преобразователя было исследовано влияние на степень однородности электрического поля длины дополнительных электродов. На рисунке 24 приведена зависимость значения величины β от изменения длины дополнительных электродов l , мм от нуля (отсутствие электродов) до значения, равного внутреннему радиусу электрода R .

Анализ полученной зависимости $\beta(l)$ показывает, что высокая однородность электрического поля в продольном направлении обеспечивается при длине дополнительных электродов $0,5 R$ и более. Практически такие же результаты получаются при использовании соленой воды.

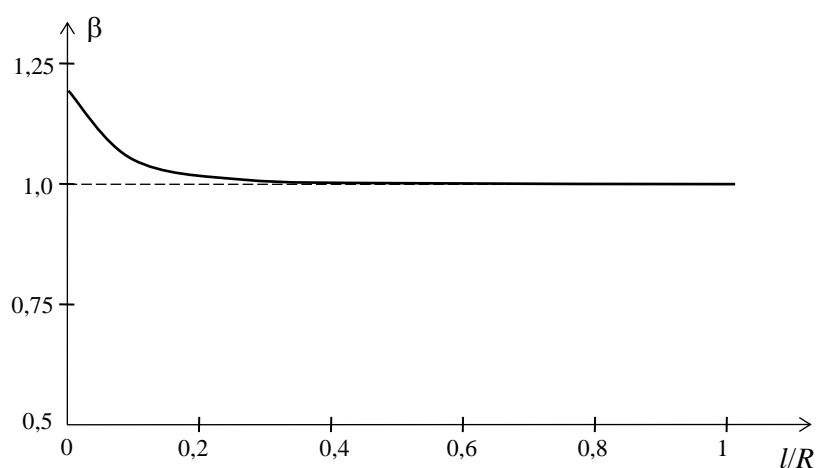


Рисунок 24 – Зависимость значения β от длины дополнительных электродов при зазоре 1 мм

Также было исследовано влияние на однородность электрического поля преобразователя расстояния между измерительным и дополнительными электродами. На рисунке 25 показано распределение электрических потенциалов при взаимодействии электрического поля преобразователя с электрическим кабелем для случая наличия дополнительных электродов длиной $0,5 R$, удаленных от измерительного электрода на расстояние 15 мм ($1,5 R$) и использования дистиллированной воды.

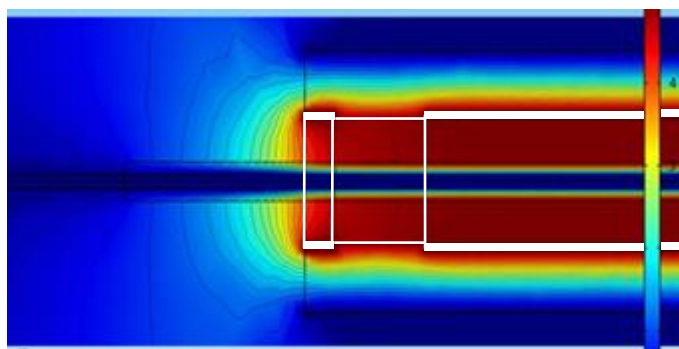


Рисунок 25 – Картина поля на краю измерительного преобразователя для ЭИИП с дополнительными электродами длиной $0,5 R$ и зазоре 15 мм (вода дистиллированная)

На рисунке 26 показано распределение в продольном направлении значений продольной E_x , В/м и радиальной E_r , В/м, пространственных составляющих вектора напряженности электрического поля преобразователя.

Электрическое поле преобразователя при указанных значениях длины дополнительных электродов и зазора характеризуется высокой однородностью в продольном направлении ($\beta=1$). Результаты моделирования показывают, что поле преобразователя имеет высокую однородность даже при увеличении зазора до $5 R$. Похожие результаты наблюдаются и при использовании соленой воды.

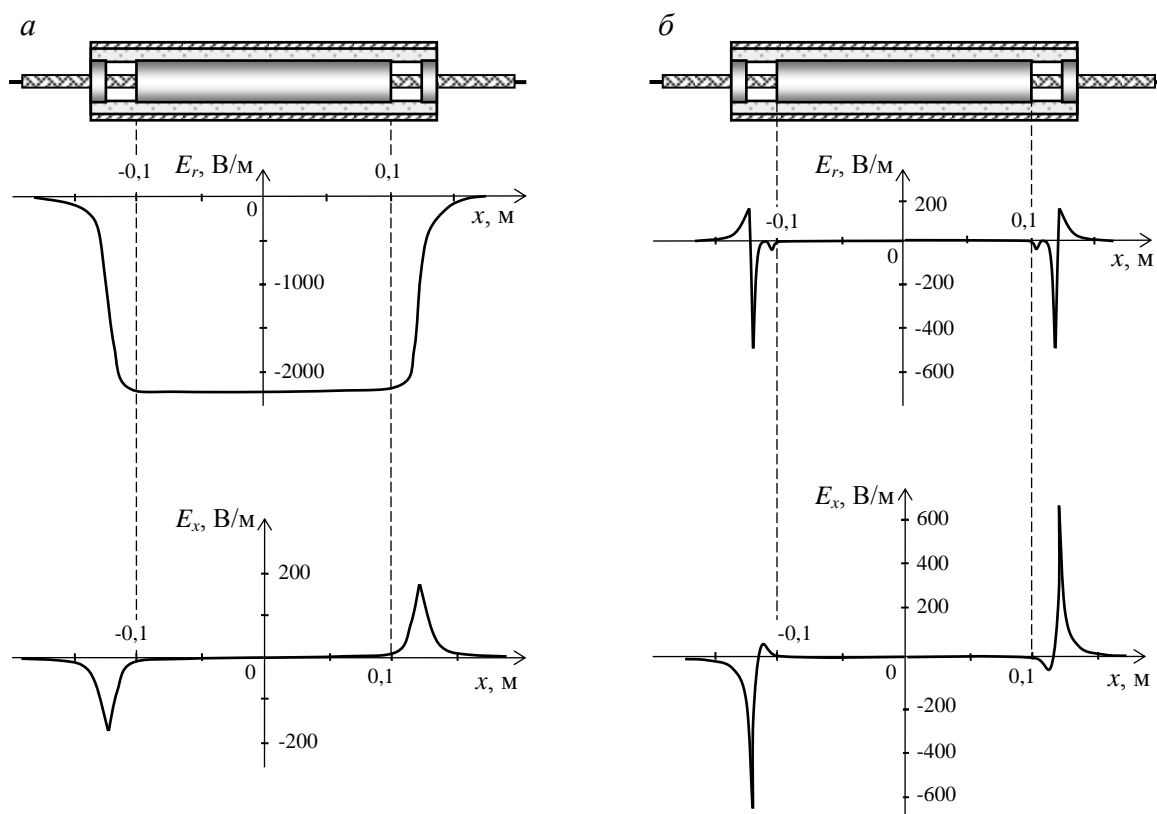


Рисунок 26 – Распределение радиальной E_r и продольной E_x составляющих напряженности электрического поля в средней части оболочки кабеля (а) и вблизи внутренней поверхности измерительного электрода (б) для ЭИП с дополнительными электродами длиной $0,5 R$ и зазоре 15 мм

Достаточно однородное в продольном направлении поле при необходимости может быть получено при весьма малой длине дополнительных электродов, но при их значительном удалении от измерительного электрода. На рисунке 27 показано распределение электрических потенциалов при взаимодействии электрического поля преобразователя с электрическим кабелем при длине дополнительных электродов всего $0,1 R$, зазоре 8 мм и использовании дистиллированной воды. Значение величины β для этого случая близко к единице.

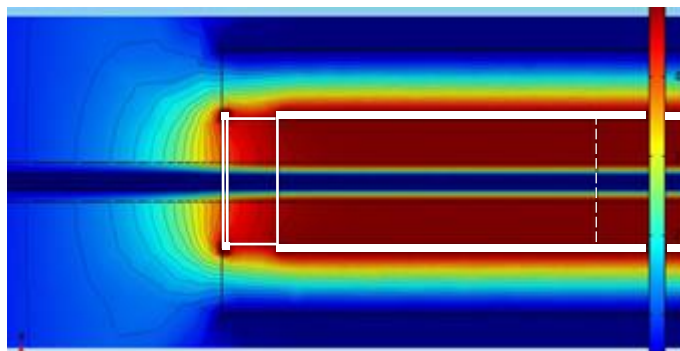


Рисунок 27 – Картина поля на краю измерительного преобразователя для ЭЕИП с дополнительными электродами длиной $0,1R$ и зазоре 8 мм (вода дистиллированная)

Обобщая результаты исследования влияния на характеристики ЭЕИП длины дополнительных электродов и зазора между дополнительными и измерительным электродами, можно сделать вывод, что оптимальными конструктивными параметрами преобразователя при использовании как дистиллированной, так и соленой воды являются длина дополнительных электродов $(0,5 \dots 1) R$ и зазор $(1 \dots 3)$ мм.

На основе полученных с помощью компьютерного моделирования ЭЕИП значений геометрических параметров сконструирован электроемкостный преобразователь, обеспечивающий высокую однородность электрического поля в продольном направлении в зоне измерения. Данный преобразователь имеет следующие параметры: длина измерительного электрода – 200 мм; длина дополнительных электродов – 70 мм; внутренний диаметр электродов – 20 мм; внутренний диаметр корпуса – 40 мм; расстояние между измерительным и дополнительными электродами – 1,5 мм [68-71].

2.3 Выводы по главе 2

1. Разработана конструкция электроемкостного измерительного преобразователя (ЭЕИП), используемого для измерения емкости одножильного электрического провода в процессе его производства на стадии нанесения изоляции на токопроводящую жилу.

2. На основе компьютерного моделирования взаимодействия электрического поля электроемкостного измерительного преобразователя с электрическим проводом в среде COMSOL Multiphysics определены оптимальные конструктивные параметры измерительного преобразователя: внутренний диаметр трубчатых электродов, длина измерительного и дополнительных электродов, расстояние между измерительным и дополнительными электродами, внутренний диаметр цилиндрического корпуса преобразователя.

3. Выявлено, что оптимальные размеры конструкции преобразователя обеспечивают минимальную зависимость результата измерения емкости провода от его геометрических размеров, электрических свойств изоляции и изменения электропроводности воды. Оптимальный вариант конструкции преобразователя обеспечивает однородное электрическое поле внутри измерительного электрода.

4. Оптимальность конструкции преобразователя можно оценить степенью приближения к единице отношения значений погонной емкости $C_{п}$, пФ/м, между электродом и проводящей жилой провода на участках по всей длине измерительного электрода и погонной емкости C_0 , пФ/м, на участке в центральной части электрода (где электрическое поле является заведомо однородным в продольном направлении).

5. Оценено влияние на характеристики измерительного преобразователя значение электропроводности используемой воды.

ГЛАВА 3. АЛГОРИТМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СИГНАЛА

В п. 1.4 описан выбранный метод измерения емкости электрического провода, основанный на использовании трубчатого электрода, погруженного в воду охлаждающей ванны экструзионной линии. С помощью компьютерного моделирования (п. 2.2) определены оптимальные значения конструктивных параметров используемого трубчатого электрода, позволяющие минимизировать методическую погрешность измерения емкости провода [68-71].

При реализации данного метода осуществляется измерение силы тока I_x , мА в электрической цепи измерительного электрода (рисунок 16), связанной линейной зависимостью с погонной емкостью C_n , пФ/м участка провода, взаимодействующего с электрическим полем измерительного электрода. Соответственно, погонная емкость C_n , пФ/м может быть определена по результатам измерения силы тока I_x , мА при использовании линейной функции преобразования вида:

$$C_n = C_0 + k \cdot I_x, \quad (24)$$

где C_0 , пФ/м, и k , пФ/(м·А) – постоянная составляющая и коэффициент пропорциональности, значения которых зависят от амплитуды и частоты напряжения генератора 8 (рисунок 16), а также конструктивных параметров преобразователя и определяются экспериментально при первичной настройке измерителя емкости.

Схема замещения электрической цепи измерительного электрода показана на рисунке 28. Здесь C_x , пФ/м, и R_x , кОм/м – емкость и активное сопротивление изоляции участка контролируемого провода, находящегося во взаимодействии с электрическим полем измерительного электрода. Кроме электрических параметров провода в схему замещения входят также емкости C_1 и C_2 , пФ/м и активные сопротивления R_1 и R_2 , кОм/м. Элементы электрической цепи C_1 , пФ/м и R_1 , кОм/м отражают электрические свойства

слоя воды, находящейся между внутренней поверхностью измерительного электрода и наружной поверхностью контролируемого провода, а элементы C_2 , пФ/м и R_2 , кОм/м отражают наличие паразитных емкости и активного сопротивления между измерительным электродом и землей (общим проводом).

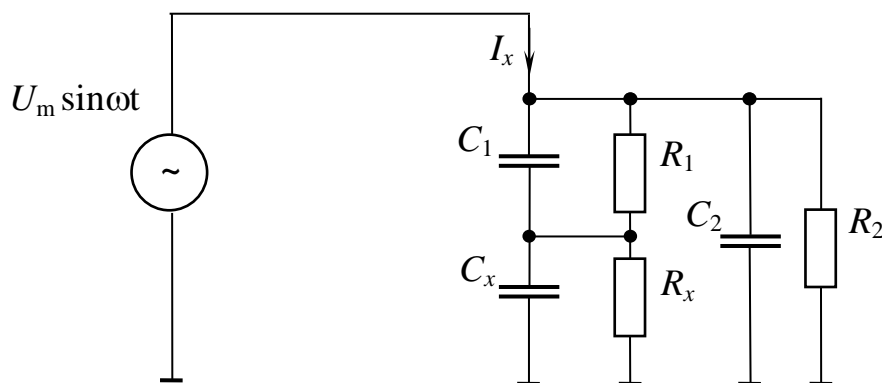


Рисунок 28 – Схема замещения электрической цепи измерительного электрода

В соответствии с приведенной схемой замещения измеряемая сила электрического тока \dot{I}_x является функцией не только переменного напряжения \dot{U} генератора 8 (рисунок 16) и величин C_x , пФ/м и R_x , кОм/м, определяющих параметры комплексного емкостного сопротивления контролируемого участка провода, но и величин C_1 , R_1 , C_2 , R_2 . Следует отметить, что значения всех указанных дополнительных элементов электрической цепи в разной мере зависят от электропроводности воды [67].

3.1 Экспериментальное исследование влияния на функцию преобразования электропроводности воды

Как было уже сказано ранее (п. 1.3.2) электрическая проводимость воды зависит в основном от концентрации и химического состава растворенных в ней солей, кислот и оснований, а также температуры воды.

Для определения степени влияния изменения электропроводности воды на функцию преобразования емкости контролируемого провода в выходной

сигнал ЭИП проведено исследование, для которого использовались образцы одножильных проводов с наружным диаметром до 4 мм со значениями погонной емкости, находящимися в интервале от 180 до 460 пФ/м и близкими значениями тангенса угла диэлектрических потерь изоляции. Действительное значение погонной емкости провода определялось путем ее измерения в соответствии с ГОСТ 27893-88 при комнатной температуре $+(22 \pm 1)^\circ\text{C}$ и при использовании чистой водопроводной воды той же температуры (Приложение А).

Изменение электропроводности воды производилось за счет растворения в изначально пресной (водопроводной) воде поваренной соли NaCl, чем обеспечивалось изменение весовой концентрации соли λ в диапазоне (0...4) г/л. Использование соли NaCl объясняется доступностью, безвредностью и простотой утилизации данного вещества. Кроме того, соль NaCl – наиболее распространенная примесь в технической воде [41-42].

Температура раствора и амплитуда переменного напряжения в процессе эксперимента поддерживались постоянными. Эксперименты производились при комнатной температуре воздуха и воды $+(22 \pm 1)^\circ\text{C}$.

На рисунке 29 приведены полученные в результате эксперимента годографы относительного значения тока \dot{I}_x от изменения погонной емкости провода $C_{\text{п}}$, пФ/м (сплошные линии) и весовой концентрации соли λ , г/л (пунктирные линии).

Анализ зависимостей (рисунок 29) показывает, что при изменении погонной емкости провода и при изменении концентрации соли наблюдаются изменения, как амплитуды, так и фазы измеряемого тока I_x . Данный эффект подтверждает, что в электрическую цепь измерительного электрода кроме участка провода входят и другие элементы, электрические параметры которых зависят от электропроводности воды (рисунок 28).

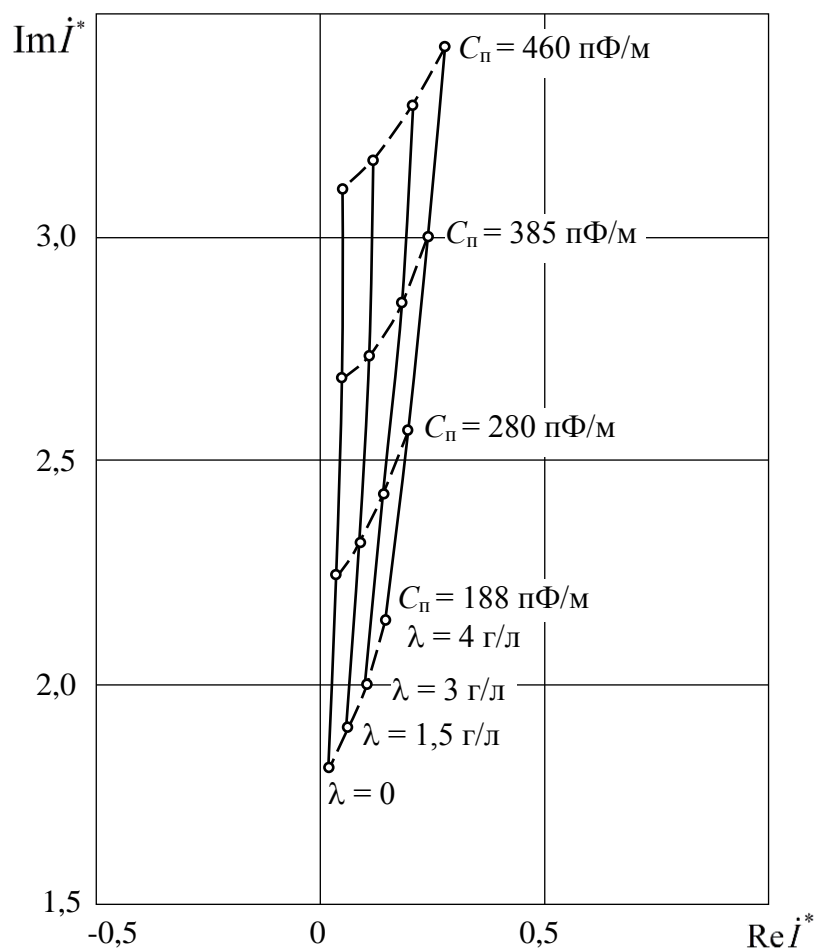


Рисунок 29 – Годографы сигнала электроемкостного преобразователя от изменения погонной емкости электрического провода C_{Π} и весовой концентрации соли λ

В качестве нормирующего значения силы тока принималось его амплитудное значение для случая отсутствия провода в преобразователе (что соответствует значению погонной емкости $C_{\Pi} = 0$) и использования дистиллированной воды с минимальной концентрацией примесей $\lambda \rightarrow 0$. При этом принималось, что фаза действительной составляющей тока $\text{Re } \dot{I}_x^*$ совпадает с фазой выходного напряжения генератора 8 (рисунок 16).

Таким образом, изменение весовой концентрации соли в исследуемом интервале (0...4) г/л вызывает изменение амплитуды тока от 10 % для больших значений C_{Π} до 20 % для малых значений C_{Π} . Соответственно, проведение измерения погонной емкости без учета данного влияющего фактора обуславливает столь же высокую погрешность измерения.

3.2 Методы отстройки от влияния изменения электропроводности воды

В эксперименте изменение удельной электропроводности воды обеспечивалось за счет изменения концентрации примеси (солености). Изменение состава примеси и температуры воды оказывают такое же влияние на результаты контроля емкости, что и изменение солености. Соответственно, для отстройки от влияния всех трех перечисленных факторов применимы одинаковые методы отстройки.

Для нахождения функции обратного преобразования измеренного значения тока в значение погонной емкости электрического провода с учетом влияния солености воды можно воспользоваться результатами экспериментальных исследований, приведенных на рисунке 30.

Анализ этих результатов показывает, что для определения величины погонной емкости провода C_n , пФ/м может быть использована линейная функция преобразования вида

$$C_n = C_{01}(\lambda) + k_1(\lambda) \cdot I_x^*, \quad (25)$$

где $C_{01}(\lambda)$ и $k_1(\lambda)$ – постоянная составляющая и коэффициент пропорциональности, являющиеся функциями концентрации соли в воде.

Функции $C_{01}(\lambda)$ и $k_1(\lambda)$ с достаточной степенью точности описываются полиномами второй степени, коэффициенты которых определяются конструктивными параметрами конкретного электроемкостного преобразователя.

Значение весовой концентрации соли, необходимое для определения значений функций $C_{01}(\lambda)$, пФ/м и $k_1(\lambda)$, пФ/(м·А) может быть определено как прямыми, так и косвенными измерениями. В данной работе использован метод отстройки от влияния на результаты контроля изменения солености воды на основе косвенных измерений электропроводности воды.

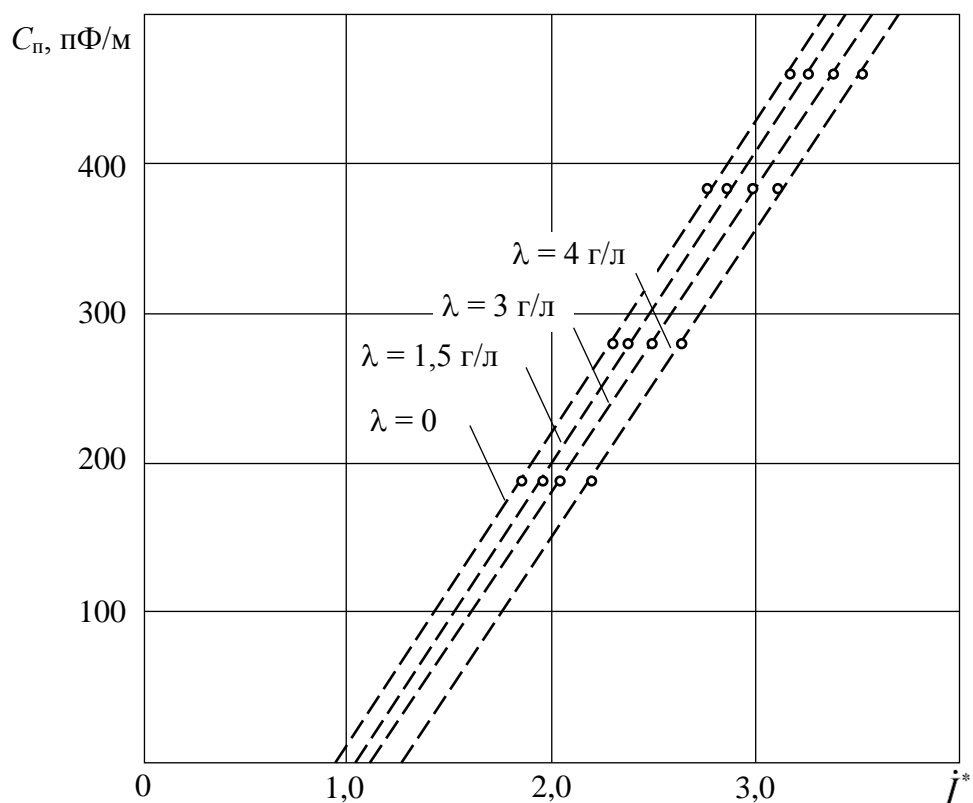


Рисунок 30 – Зависимость относительного амплитудного значения тока \dot{I}^* от погонной емкости провода C_n и весовой концентрации соли в воде

3.2.1 Отстройка от влияния изменения электропроводности воды на основе измерения фазы тока измерительного электрода

Анализ зависимостей на рисунке 29 показывает, что с возрастанием весовой концентрации соли монотонно возрастает фазовый угол φ между вектором тока \dot{I}^* и мнимой осью комплексной плоскости и соответственно возрастает отношение $t = \text{Re } \dot{I}^* / \text{Im } \dot{I}^*$, равное $\text{tg } \varphi$. Это дает возможность использовать результаты измерения комплексных составляющих тока \dot{I}^* для отстройки от изменения электропроводности воды.

По аналогии с (25) уравнение обратного преобразования значения амплитуды тока \dot{I}^* в значение погонной емкости описывается линейной зависимостью

$$C_n = C_{02}(t) + k_2(t) \cdot I_x^*, \quad (26)$$

где $C_{02}(t)$, пФ/м и $k_2(t)$, пФ/(м·А) – постоянная составляющая и коэффициент пропорциональности, являющиеся функциями величины t , отражающей текущее значение электропроводности воды [66-67, 74].

Функции $C_{02}(t)$, пФ/м и $k_2(t)$, пФ/(м·А) также как и функции $C_{01}(\lambda)$, пФ/м и $k_1(\lambda)$, пФ/(м·А) с достаточной степенью приближения могут быть описаны полиномами второй степени, коэффициенты которых определяются конструктивными параметрами используемого электроемкостного преобразователя и находятся экспериментально при первичной настройке измерителя емкости.

Экспериментально были определены коэффициенты полиномов второго порядка, используемых для аппроксимации функций $C_{02}(t)$ и $k_2(t)$:

$$\begin{aligned} C_{02}(t) &= -13400 \cdot t^2 + 60 \cdot t - 170 \text{ Ф/м}; \\ k_2(t) &= -27769 \cdot t^2 + 3083 \cdot t + 660 \text{ Ф/(м·А)}. \end{aligned} \quad (27)$$

Для оценки эффективности описанного метода отстройки от влияния изменения электропроводности воды на результаты контроля погонной емкости одножильного электрического провода был осуществлен численный эксперимент с использованием функции преобразования (27) для обработки массива экспериментальных данных, полученных для одножильных проводов со значениями погонной емкости в диапазоне (160...460) пФ/м при изменении весовой концентрации соли в воде в диапазоне (0...4) г/л.

На рисунке 31 представлены результаты данного исследования. Интервалы изменений результатов измерений погонной емкости C_x , пФ/м при изменении электропроводности воды для различных проводов (имеющих различные действительные значения погонной емкости C_d , пФ/м) без использования отстройки от влияния изменения электропроводности воды показаны на рисунке пунктирными линиями, а для случая использования отстройки – сплошными. Анализ этих результатов показывает, что без отстройки от влияния изменений электропроводности относительная

погрешность измерения может достигать 20 %, а при использовании отстройки рассчитанные по формуле (27) значения погонной емкости не отличаются для указанных диапазонов изменения влияющих параметров от действительных значений более чем на 2,5 %. Ограничением диапазонов изменения влияющих параметров указанная погрешность измерения может быть кратно уменьшена [75].

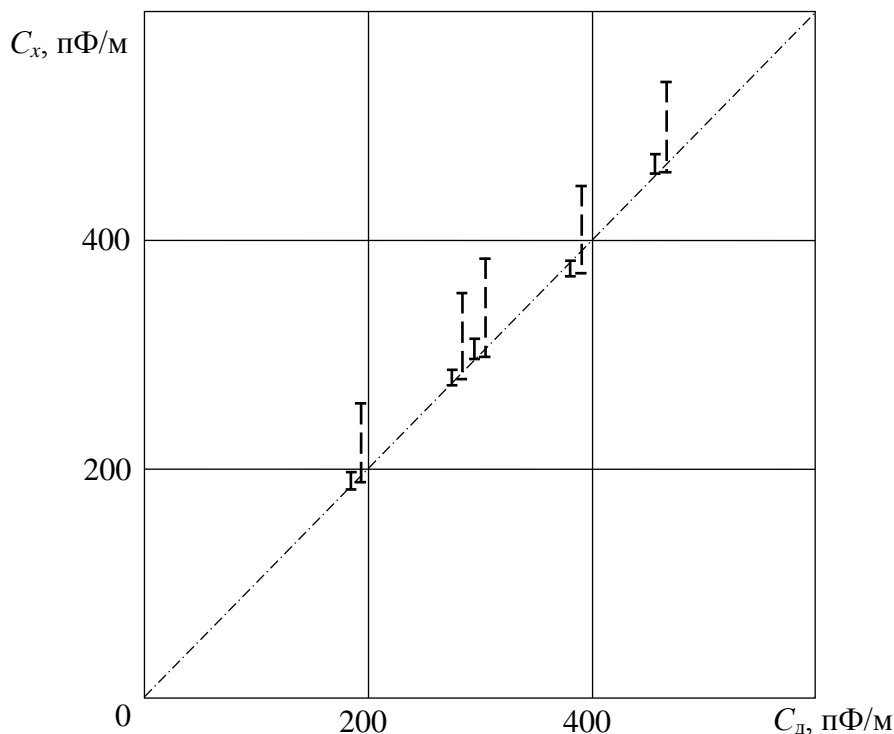


Рисунок 31 – Интервалы изменений результатов измерений погонной емкости C_x при изменении электропроводности воды для различных действительных значений погонной емкости C_d

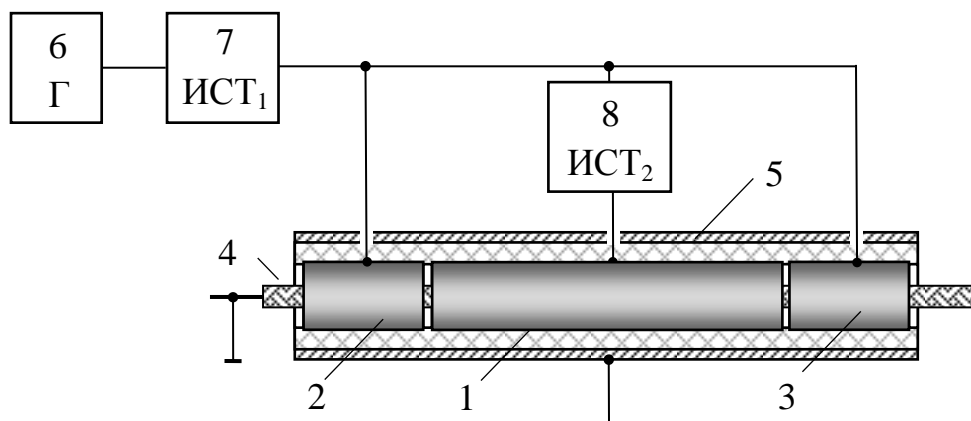
Таким образом, результатами эксперимента доказана высокая эффективность метода отстройки от влияния изменений электропроводности воды, основанного на измерении фазы измеряемого тока. Однако данный метод отстройки может оказаться недостаточно эффективен при его использовании в случае, если в процессе контроля изменение фазы измеряемого тока происходит не только из-за изменения электропроводности воды, но и при изменении соотношения электрических параметров провода C_x , пФ/м и R_x , кОм/м. Кроме того, в этом случае невозможен отдельный

контроль данных электрических параметров, что ограничивает информативность контроля.

3.2.2 Отстройка от влияния изменения электропроводности воды на основе измерения тока генератора

В случае, когда изменение фазы измеряемого тока происходит из-за изменении соотношения электрических параметров провода C_x , пФ/м и R_x , кОм/м, может быть использован другой метод отстройки от изменений электропроводности, заключающийся в получении информации об электропроводности воды путем измерения тока генератора I_1 , мА, нагрузкой которого являются все электроды измерительного преобразователя.

Устройство, реализующее предлагаемый метод отстройки, работает аналогично предыдущему (рисунок 16). Отличительной особенностью данного устройства является наличие двух измерителей силы тока 7 (ИСТ₁) и 8 (ИСТ₂) (рисунок 32).



1 – измерительный электрод; 2,3 – дополнительные электроды; 4 – контролируемый провод; 5 – корпус; 6 – генератор; 7, 8 – измерители силы тока

Рисунок 32 – Схема устройства для реализации отстройки на основе измерения тока генератора

Измеритель силы тока 7 (ИСТ₁) включен между выходом генератора 6 и электрически соединенными дополнительными электродами 2 и 3. Измеритель силы тока 8 (ИСТ₂) включен между измерительным 1 и электрически соединенными дополнительными электродами 2 и 3. Электропроводящая жила провода 4 и корпус измерительного преобразователя 5 соединены с общим проводом (металлическим корпусом охлаждающей ванны).

Измерителем силы тока 8 (ИСТ₂) осуществляют измерение тока I_x , мА в электрической цепи измерительного электрода 1, а измерителем силы тока 7 (ИСТ₁) – измерение силы тока I_1 , мА генератора 6 (Г). При реализации описанного метода измеряются амплитудные либо действующие значения токов, либо их комплексные составляющие. Значение тока I_x , мА связано с электрическими параметрами провода. Значение тока I_1 , мА практически линейно связано с электропроводностью воды и изменяется для используемого электроемкостного преобразователя и указанных ранее режимов контроля и диапазона изменений весовой концентрации соли в воде в диапазоне (3...35) мА.

Значение тока I_1 , мА, отражающее значение электропроводности воды, используется для корректировки функциональной зависимости, с помощью которой определяется значения погонной емкости участка провода C_n , пФ/м по результатам измерения тока I_x , мА.

По аналогии с (25) и (26) уравнение обратного преобразования значения амплитуды тока i^* в значение погонной емкости описывается линейной зависимостью

$$C_n = C_{03}(I_1) + k_3(I_1) \cdot I_x^*, \quad (28)$$

где $C_{03}(I_1)$, Ф/м и $k_3(I_1)$, Ф/(м·А) – постоянная составляющая и коэффициент пропорциональности, являющиеся функциями величины тока I_1 , отражающей электропроводность воды. Измеренное значение тока I_1 , мА, используют для определения значения функции $C_{03}(I_1)$ и $k_3(I_1)$, которые с достаточной степенью приближения могут быть описаны полиномами

второй степени. Коэффициенты этих функций зависят от конкретных конструктивных параметров измерительного преобразователя и определяются экспериментально при первичной настройке измерителя емкости.

Экспериментально были определены коэффициенты полиномов второго порядка, используемых для аппроксимации функций $C_{03}(I_1)$ и $k_3(I_1)$:

$$C_0(I_1) = (-1,8 \cdot 10^2 \cdot I_1^2 + 3,75 \cdot I_1 - 0,23) \cdot 10^{-9} \text{ Ф/м};$$

$$k(I_1) = (25,2 \cdot I_1^2 - 1,25 \cdot I_1 + 0,19) \cdot 10^{-4} \text{ Ф/(м} \cdot \text{А)}. \quad (29)$$

В данном случае использовались амплитудные значения токов в амперах. Далее значение емкости $C_{\text{п}}$, пФ/м вычисляется по формуле (28).

Благодаря такой отстройке от изменений электропроводности воды их влияние на результаты измерения емкости может быть уменьшено в несколько раз.

К факторам, несколько снижающим эффективность данного метода отстройки от влияния на результаты контроля изменений электропроводности воды, следует отнести возможное наличие повышенного уровня шума в цепи измерения тока генератора I_1 , мА ввиду распределенного характера этой цепи.

На рисунке 33 для сравнения показаны в виде диаграммы интервалы изменений модулей абсолютных погрешностей измерения погонной емкости $|\Delta C|$, пФ/м при изменении электропроводности воды для различных проводов для трех случаев: без использования отстройки от изменения электропроводности воды – белый цвет заливки; с использованием отстройки по формуле (26) – серый цвет заливки и с использованием отстройки по формуле (28) – заливка косой штриховкой.

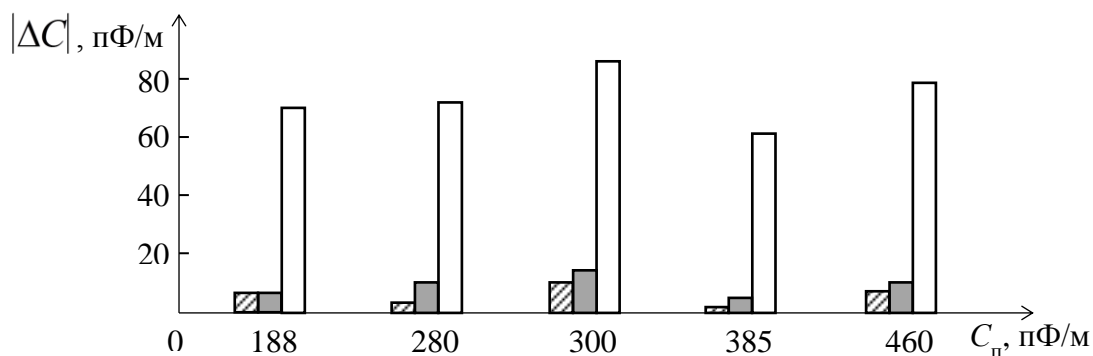


Рисунок 33 – Интервалы изменений абсолютных погрешностей $|\Delta C|$ измерения погонной емкости $C_{п}$ в условиях изменения солёности воды от 0 до 4 г/л для различных образцов провода

3.3 Выводы по главе 3

1. Предложен алгоритм преобразования выходного сигнала измерительной информации используемого ЭЕИП в значение емкости контролируемого провода.

2. Представлены результаты экспериментальных исследований влияния изменения удельной электропроводности воды на результат измерения емкости провода. Показано, что без учета данного влияния погрешность измерения емкости провода в диапазоне изменения емкости от 50 до 500 пФ/м и в условиях изменения солёности воды от 0 до 4 г/л может достигать 20 %.

3. Предложены две методики отстройки от влияния изменения электропроводности на результат измерения емкости на основе измерения фазы тока измерительного электрода и на основе измерения тока генератора. Показана эффективность использования предложенных отстроек, позволяющих уменьшить погрешность измерения емкости провода в несколько раз.

ГЛАВА 4. ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЯ ЕМКОСТИ

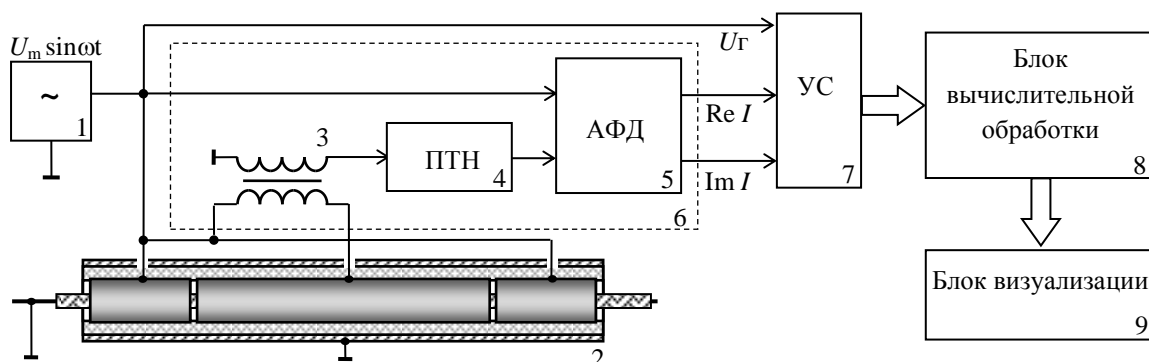
4.1 Измеритель емкости САР-10

Измеритель емкости САР-10 предназначен для контроля емкости одножильного провода непосредственно в процессе производства на стадии нанесения изоляции на токопроводящую жилу. Прибор обеспечивает измерение значения погонной емкости провода, сравнение измеренного значения с предельно допустимыми значениями емкости, осуществляет индикацию результата измерения, а также может создавать и хранить массив значений результатов измерения за заданный промежуток времени.

Измеритель САР-10 используется для контроля емкости одножильных проводов с наружным диаметром изоляции (0,5...12) мм. Диапазон измеряемой погонной емкости провода (50...500) пФ/м. Прибор обеспечивает измерение емкости с максимально допустимой погрешностью 2,5 % от номинального значения погонной емкости провода в диапазоне изменения электропроводности воды, эквивалентной изменению концентрации NaCl в диапазоне (0...4) г/л.

В измерителе емкости реализуется метод амперметра-вольтметра для измерения емкости провода (раздел 1.4.1). Первичный измерительный преобразователь выполнен в виде трубчатого электрода, погруженного вместе с контролируемым проводом в воду охлаждающей ванны экструзионной линии (раздел 1.4.2). Оптимальные размеры конструкции преобразователя подобраны с использованием результатов компьютерного моделирования взаимодействия электрического поля ЭИП с электрическим проводом (раздел 2.2). Оптимальный вариант конструкции преобразователя обеспечивает однородное в продольном направлении электрическое поле внутри измерительного электрода, что обеспечивает минимальную зависимость результата измерения емкости провода от его геометрических размеров, свойств изоляции и электропроводности воды.

Структурная схема измерителя емкости САР-10 приведена на рисунке 34. Измеритель емкости состоит из генератора 1 гармонического напряжения $U_m \sin \omega t$ с заданными амплитудой $U_m = 3,5 \text{ В}$ и угловой частотой $\omega = 2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ кГц}$, ЭЕИП 2, блока аналогового преобразования 6, устройства сопряжения 7, блока вычислительной обработки 8, блока визуализации 9.



1 – генератор; 2 – ЭЕИП; 3 – трансформатор тока; 4 – преобразователь ток-напряжение; 5 – амплитудно-фазовый детектор; 6 – блок аналогового преобразования; 7 – устройство сопряжения; 8 – блок вычислительной обработки сигнала; 9 – блок визуализации

Рисунок 34 – Структурная схема измерителя емкости САР-10

Выходным сигналом ЭЕИП является ток I_x , мА, амплитуда которого пропорциональна измеряемому значению емкости контролируемого провода. Этот сигнал подается на вход блока аналогового преобразования сигнала 6, в состав которого входит трансформатор тока (ТТ) 3, преобразователь ток-напряжение (ПТН) 4, амплитудно-фазовый детектор (АФД) 5. ТТ служит для гальванической развязки измерительной цепи электрода и схемы аналогового преобразования сигнала. С выхода ТТ ток I_x , мА подается в ПТН для преобразования в напряжение и далее – на вход АФД, в котором осуществляется выделение мнимой и действительных составляющих сигнала измерительной информации. Опорным сигналом АФД является напряжение генератора 1. Выходные напряжения АФД ($\text{Re } U$ и $\text{Im } U$), пропорциональные амплитудным значениям комплексных составляющих тока цепи

измерительного электрода, подаются на входы устройства сопряжения (УС) 7. УС представляет собой плату сбора данных, в качестве которой используется модуль USB3000 – универсальный скоростной восьмиканальный АЦП. УС осуществляет преобразование аналогового сигнала в цифровой код и передачу его в персональный компьютер. Подключение модуля USB3000 к компьютеру ПК осуществляется через USB-порт компьютера.

Блок вычислительной обработки сигнала 8 и блок визуализации 9 реализуются на персональном компьютере с использованием программного обеспечения, разработанного в среде LabView. В блоке вычислительной обработки сигналов 8 осуществляется фильтрация, усреднение результатов измерения за 1 секунду и дальнейшая вычислительная обработка сигналов измерительной информации в соответствии с алгоритмом преобразования (глава 3). Блок визуализации 9 предназначен для представления измерительной информации в удобном для оператора виде [75-76].

4.1.1 Алгоритм программного преобразования сигнала измерительной информации в САР-10

Алгоритм преобразования сигнала измерительной информации ЭЕИП в результат измерения емкости контролируемого провода подробно изложен в главе 3. Уменьшение влияния изменения электропроводности воды реализовано за счет выполнения отстройки на основе косвенного определения текущего значения электропроводности воды. Отстройка может быть реализована на основе определения фазы тока измерительного электрода ЭЕИП (раздел 3.2.1) и на основе определения тока генератора (раздел 3.2.2).

Измеритель емкости САР-10 может реализовывать оба вида отстройки от влияния изменения электропроводности воды, но основной является отстройка, основанная на определении фазы тока ЭЕИП.

Другой вид отстройки, основанный на определении тока генератора I_1 , мА (рисунок 32), целесообразно использовать только в случае, когда изменение фазы измеряемого тока происходит не только из-за изменения электропроводности воды, но и из-за изменения соотношения электрических параметров провода C_x , пФ/м и R_x , кОм/м. Кроме того, этот вид отстройки применим, когда необходимо проводить отдельный контроль электрических параметров провода. Переключение между двумя видами отстроек осуществляется программно.

Алгоритм вычислительного преобразования сигналов измерительной информации представлен на рисунке 35.

В соответствии с методикой отстройки, описанной в разделе 3.2.1, в программу вычислительной обработки вводятся преобразованные в цифровой код значения комплексных составляющих тока цепи измерительного электрода $\text{Re } \dot{I}_x$ и $\text{Im } \dot{I}_x$, пропорциональные емкости контролируемого провода. Также в программу вводятся значения выходного напряжения генератора U_Γ , В. Для исключения влияния напряжения генератора на результат измерения комплексных составляющих тока \dot{I}_x

осуществляется нормирование их значений: $\text{Re}_N I_x = \frac{\text{Re } \dot{I}_x}{U_\Gamma}$, $\text{Im}_N I_x = \frac{\text{Im } \dot{I}_x}{U_\Gamma}$.

Для реализации первой отстройки вычисляется значение отношения $t = \frac{\text{Re}_N I_x}{\text{Im}_N I_x}$, равного $\text{tg } \varphi$, где φ – угол между вектором тока и мнимой осью

комплексной плоскости. Также производится расчет амплитуды тока

$$I_x = \sqrt{\text{Re}_N I_x^2 + \text{Im}_N I_x^2}.$$

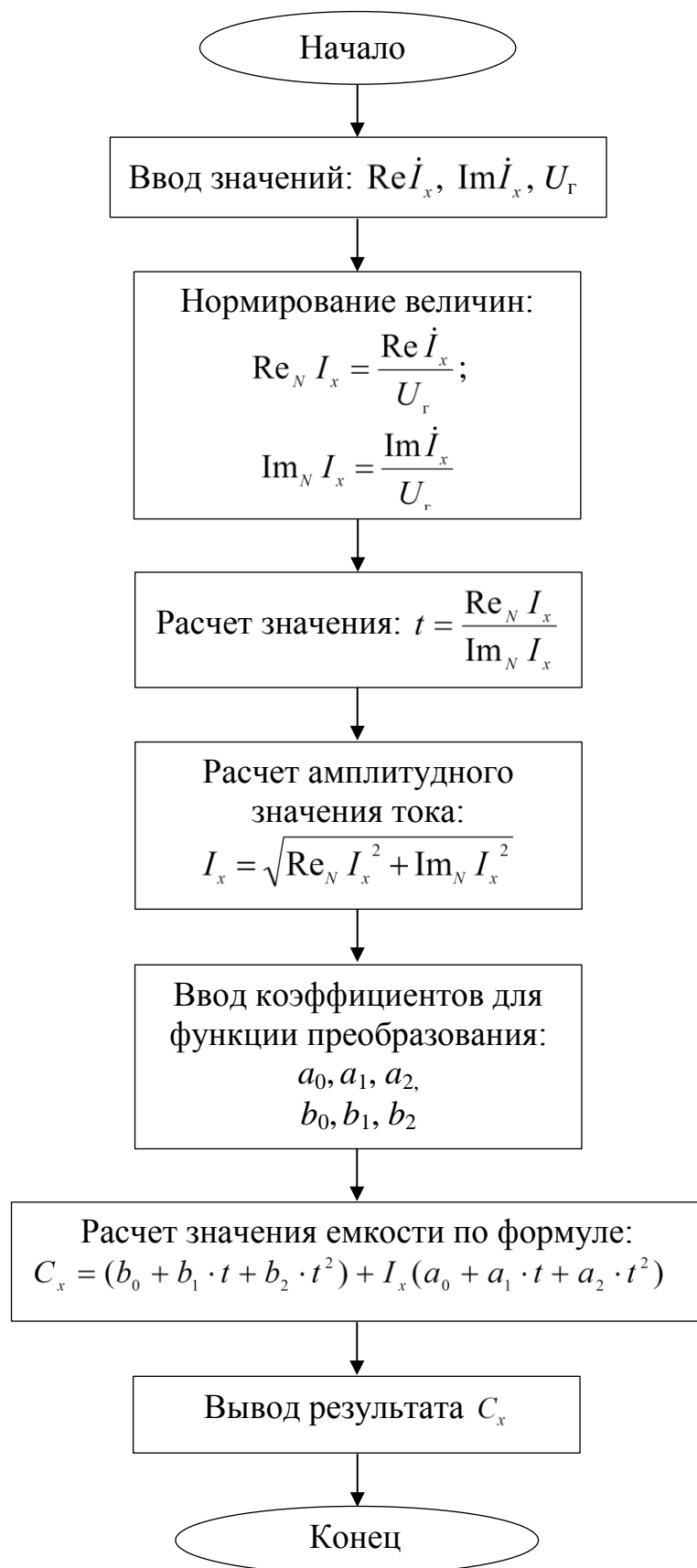


Рисунок 35 – Алгоритм вычислительной обработки сигнала измерительной информации

Значение емкости контролируемого провода C_x , пФ/м рассчитывается по формуле (26), постоянная составляющая $C_{02}(t)$ и коэффициент пропорциональности $k_2(t)$ которой являются функциями величины

$$t = \frac{\operatorname{Re}_N I_x}{\operatorname{Im}_N I_x}:$$

$$\begin{aligned} C_{02}(t) &= b_0 + b_1 \cdot t + b_2 \cdot t^2; \\ k_2(t) &= a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2. \end{aligned} \quad (30)$$

Коэффициенты функций $C_{02}(t)$ и $k_2(t)$ определяются при первичной настройке измерителя емкости САР-10 (см. раздел 5.1) и вводятся в программу вычислительной обработки сигналов для компенсации влияния изменения электропроводности воды на результат измерения емкости провода.

Если при установке измерителя емкости на технологической линии или в процессе его эксплуатации обнаруживается, что измеренное значение емкости провода C_x , пФ/м отличается от действительного значения емкости образца провода C_d , пФ/м на величину ΔC , пФ/м, большую чем 2,5% от действительного значения емкости C_d , то в измерителе емкости САР-10 предусмотрена возможность автоматизированной корректировки результата измерения путем проведения «рабочей» настройки, методика которой подробно изложена в разделе 5.2.

4.1.2 Техническая реализация измерителя емкости САР-10

На рисунке 36 представлен внешний вид макета измерителя погонной емкости САР-10, составными частями которого являются ЭЕИП, блок аналоговой обработки сигналов измерительной информации, устройство сопряжения и персональный компьютер (ноутбук).

Основной управляющей программой измерителя емкости САР-10 является программа «Сметр.ви», разработанная в среде LabView 8.5.

Программа полностью соответствует алгоритму вычислительной обработки сигнала измерительной информации, представленному на рисунке 35 и описанному в п. 4.1.1.

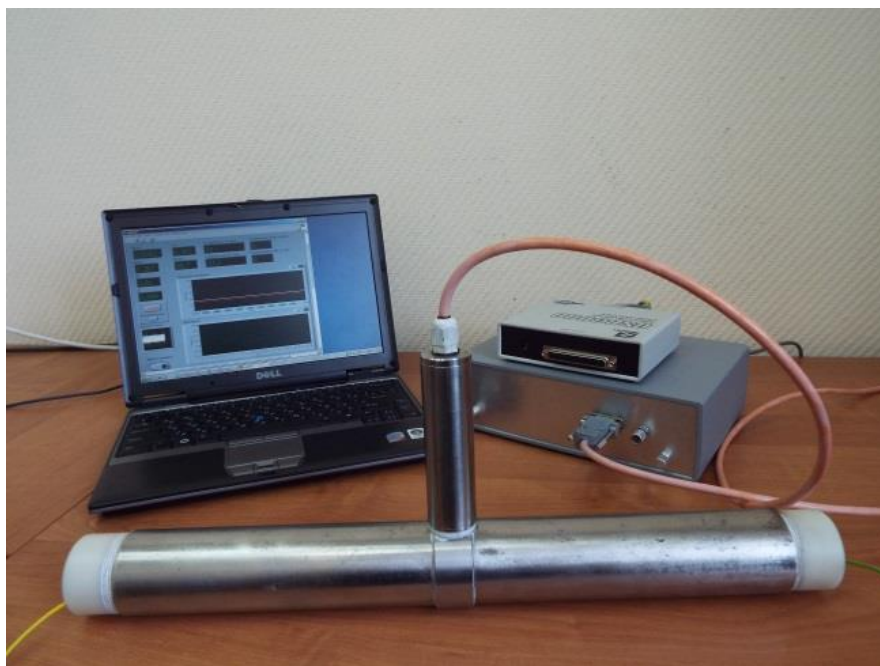


Рисунок 36 – Внешний вид измерителя погонной емкости

При открытии программы «Сметр.ви», на экране компьютера появляется лицевая панель виртуального прибора (рисунок 37), отображающая следующую информацию:

- комплексные составляющие измеренного тока « $\text{Re } \dot{I}_x$ » и « $\text{Im } \dot{I}_x$ » на цифровых индикаторах;
- выходные напряжение и ток генератора « U_T » и « I_T » на цифровых индикаторах;
- рассчитанные амплитудное значение измеренного тока « I_x » и его фазы «Phase» на цифровом индикаторе;
- временная диаграмма значения погонной емкости провода «Текущее значение»;
- рассчитанное значение погонной емкости одножильного провода «С, пФ/м» на цифровом индикаторе;
- кнопка «STOP» для остановки измерений;
- временная диаграмма «Протокол измерений» для записи массива

данных значений погонной емкости за заданный интервал времени;

- кнопка «Запись данных» для запуска и остановки записи файла протокола контроля [75-76].



Рисунок 37 – Лицевая панель измерителя емкости SAR-10

Макетный вариант измерителя емкости SAR-10 был разработан для исследования влияния изменения электропроводности воды на результат измерения емкости провода, для определения функции преобразования входного сигнала ЭЕИП в значение емкости контролируемого провода, для проверки эффективности использования предложенных отстроек от влияния изменения электропроводности воды и полученной функции преобразования (разделы 3.2.1 и 3.2.2). Также для подтверждения принципиальной возможности использования измерителя емкости для контроля емкости провода в технологическом процессе производств провода были проведены заводские испытания макетного образца измерителя емкости SAR-10 на заводе «Сибкабель» (г. Томск).

4.2 Техническая реализация измерителя емкости САР-10.1

В настоящее время измеритель емкости готовится к серийному производству, и для этого изготовлен прототип прибора более современной модификации – САР-10.1.

Внешний вид прототипа измерителя емкости САР-10.1 представлен на рисунке 38.

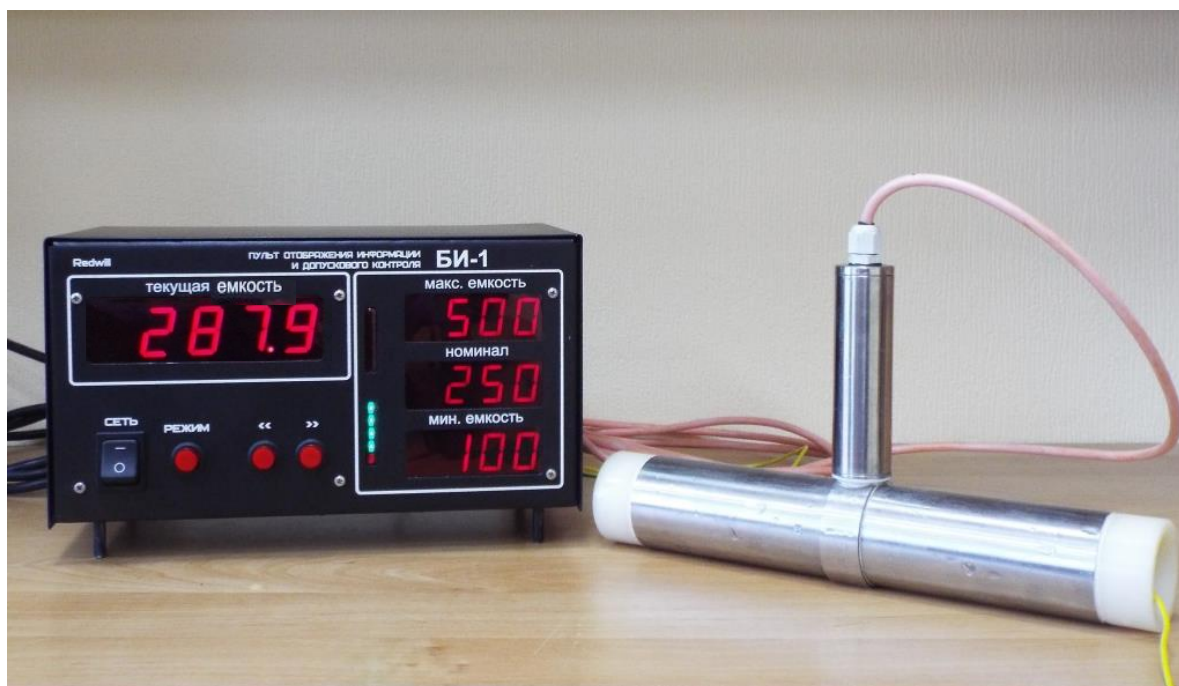


Рисунок 38 – Внешний вид прототипа измерителя емкости САР-10.1

Алгоритм преобразования сигналов измерительной информации в значение емкости контролируемого провода соответствует макетному варианту САР-10, описанному в п. 4.1.1. Отличие заключается в том, что в прототипе измерителя емкости САР-10.1 блок вычислительной обработки реализуется на микроконтроллере STM32F103VBT6.

Для визуализации измерительной информации используется пульт отображения информации и допускового контроля БИ-1, передняя панель которого представлена на рисунке 39. На панели располагаются цифровые светодиодные семисегментные индикаторы. Индикатор «Текущая емкость» 1 отображает результат измерения емкости контролируемого провода C_x , пФ/м.

Также индикатор 1 используется для отображения пунктов сервисного меню, используемого для изменения настроек измерителя емкости САР-10.1. В случае необходимости на индикаторе 1 выводятся сообщения об ошибках.



Рисунок 39 – Лицевая панель пульта отображения информации и допускового контроля БИ-1

Индикаторы 3-5 отображают соответственно максимальное, номинальное и минимальное значения емкости измеряемого провода в пФ/м. Оператор имеет возможность ввода номинальных и предельных значений для каждого вида кабельного изделия. Индикация выхода текущего значения емкости провода за допустимые значения производится светодиодной шкалой 2 и звуковым сигналом.

Навигация в сервисном меню и управление измерителем емкости осуществляется кнопками «<<<», «>>>» 6 и «РЕЖИМ» 7. Включение и выключение измерителя емкости выполняется тумблером «СЕТЬ» 8.

4.3 Использование измерителя емкости САР-10 для обнаружения локальных дефектов изоляции провода

Наличие локальных несплошностей в изоляции (трещин, порезов, инородных включений и т.д.) приводит к резкому, скачкообразному изменению геометрических параметров провода и электрических характеристик изоляции. Подобные изменения приводят к столь же резкому изменению значения емкости контролируемого провода. Измеритель емкости фиксирует даже незначительное изменение емкости, поэтому резкое изменение емкости не может остаться незамеченным для прибора.

Реакция измерителя емкости САР-10 на попадание в зону измерения участка провода с дефектом показана на рисунке 40.

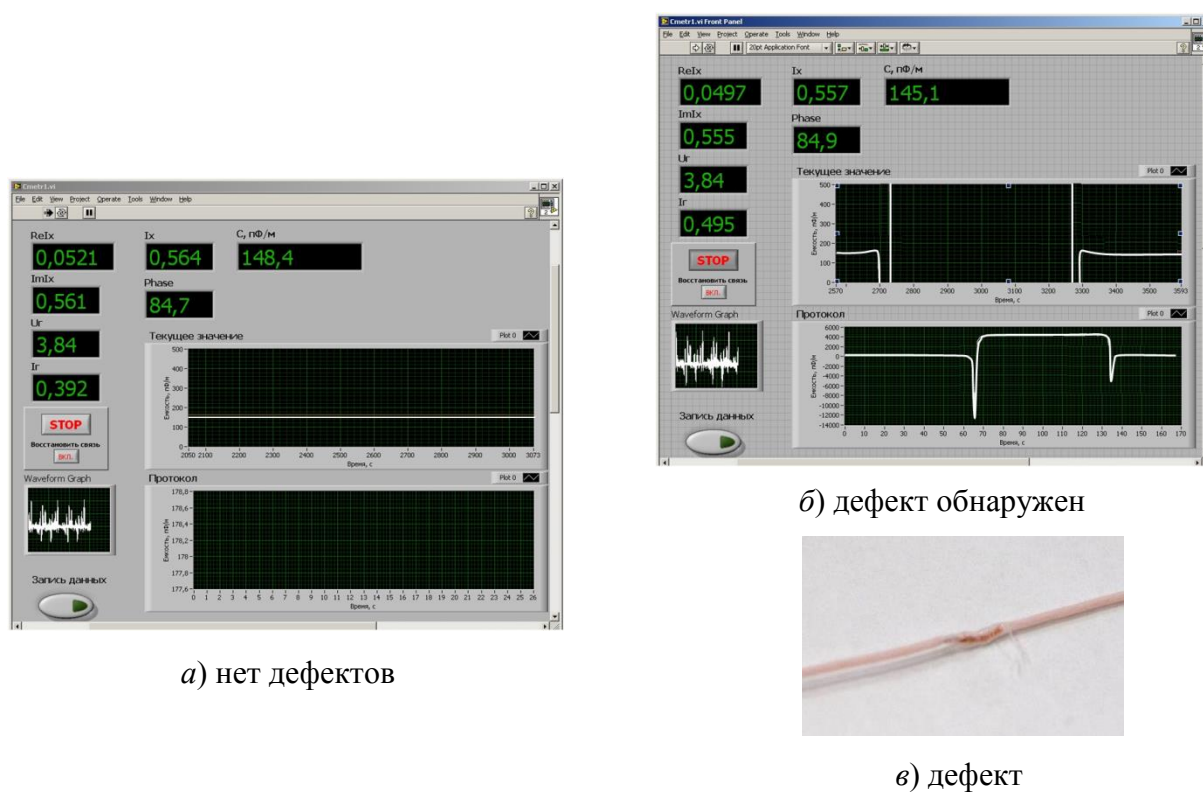


Рисунок 40 – Применение измерителя емкости для обнаружения локальных дефектов изоляции провода

На левой части рисунка (рисунок 40а) можно видеть постоянство показаний измерителя емкости в течение длительного времени, что свидетельствует об отсутствии каких-либо несплошностей в изоляции провода. Рисунок 40б демонстрирует резкое изменение (в десятки раз)

значения емкости при входе и выходе дефектного участка изоляции провода (рисунок 40 в) в зону контроля измерительного электрода САР-10. Стоит обратить внимание на то, что при нахождении дефектного участка провода внутри зоны измерения значение емкости имеет так же постоянное значение. После покидания дефектного участка провода зоны измерения значение емкости провода принимает первоначальное значение.

Следует отметить, что контролируемый провод непрерывно движется с постоянной скоростью внутри измерительного преобразователя прибора. Поэтому при известной скорости движения провода и фиксации времени обнаружения дефекта можно идентифицировать дефектный участок провода. Разрешающая способность измерителя емкости САР-10 будет зависеть от величины дефекта и скорости движения контролируемого провода.

Представленная возможность измерителя емкости САР-10 позволяет расширить сферу его применения и дополнить возможности дефектоскопии с помощью электроискрового метода контроля в кабельной промышленности.

Данный метод имеет одно неоспоримое преимущество перед электроискровым методом обнаружения дефектов изоляции провода: контроль ведется при наличии переменного напряжения амплитудой 3,5 В, что значительно безопаснее, чем использование высоковольтных электроискровых испытателей изоляции.

4.4 Выводы по главе 4

1. Описаны принцип действия, структурная схема, алгоритм вычислительного обработки выходного сигнала ЭЕИП и конструкция измерителя емкости САР-10, реализованного с использованием персонального компьютера.

2. Для компенсации влияния изменения электропроводности воды в измерителе емкости САР-10 реализованы два вида отстройки: на основе определения фазы тока измерительного электрода ЭЕИП и на основе определения тока генератора. Основным видом является отстройка на основе определения фазы тока измерительного электрода ЭЕИП. Другую отстройку, основанную на измерении тока генератора I_1 , мА, целесообразно использовать только в случае, когда изменение фазы измеряемого тока происходит не только из-за изменения электропроводности воды, но и из-за изменения соотношения электрических параметров провода C_x , пФ/м, и R_x , кОм/м.

3. Лабораторные и заводские испытания показали эффективность использования отстроек от влияния электропроводности воды. Отстройка на основе определения фазы тока измерительного электрода позволяет уменьшить погрешность измерения погонной емкости провода в диапазоне изменения емкости от 50 до 500 пФ/м и в диапазоне изменения солености воды от 0 до 4 г/л до 2,5 %.

4. Выявлено, что метод отстройки от влияния изменения электропроводности воды на основе измерения тока генератора позволяет уменьшить погрешность измерения погонной емкости провода в тех же диапазонах изменения влияющих факторов до 2,0 %.

5. Описана техническая реализация измерителя емкости САР-10.1, в котором реализован тот же алгоритм вычислительной обработки сигналов измерительной информации, только на основе использования микроконтроллера. Лабораторные исследования САР-10.1 показали такую же

эффективность использования предложенных методов отстройки от влияния мешающих факторов. Основные технические характеристики измерителей емкости различных модификаций аналогичны.

6. Показана принципиальная возможность измерители емкости САР-10 выявлять локальные дефекты изоляции провода типа прокол, трещина и т.п., что позволит дополнить возможности дефектоскопии с помощью электроискрового метода контроля.

ГЛАВА 5. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЯ ЕМКОСТИ САР-10

Для обеспечения соответствия требованиям технической документации характеристик измерителя емкости САР-10 проводится настройка прибора [77], а для определения метрологических характеристик и пригодности измерительного прибора к применению выполняется процедура калибровки [78].

Настройка и калибровка проводятся при использовании образцов провода с разными значениями погонной емкости в пределах диапазона измерения погонной емкости, обеспечиваемого измерителем емкости САР-10 (от 50 до 500 пФ/м). Образцы провода для контроля емкости, используемые для проведения настройки и калибровки измерителя емкости, изготавливаются на кабельном предприятии самостоятельно.

Образец провода представляет собой отрезок бездефектного одножильного электрического провода, изготавливаемого данным предприятием. Длина образца в соответствии с требованиями ГОСТ 27893-88 «Кабели связи. Методы испытаний» [5], должна быть не менее пяти метров. За действительные значения емкости образцов провода принимаются результаты измерений емкости в соответствии с требованиями стандартов [5, 38] при соблюдении нормальных климатических условий [38, 40], и выражаются в пФ в пересчете на единицу длины, пФ/м. Отметим, что полученное действительное значение емкости образца провода является таковым только в строго определенных условиях, в которых проводилось измерение (см. приложение А).

В разделе 1.3.2 отмечено значительное влияние изменения температуры изоляции провода на результат измерения емкости, характерное для некоторых материалов изоляции (например, для поливинилхлорида). Поэтому при подготовке образцов провода необходимо провести измерение его емкости при различных температурах изоляции провода. Добиться

требуемой температуры изоляции провода можно при использовании воды соответствующей температуры, в которой образец емкости провода до начала измерения выдерживается не менее 5 минут. Температуру изоляции необходимо менять в широком диапазоне (от нормальных условий до температуры изоляции на выходе из экструдера во время технологического процесса изготовления провода). Результаты измерений вносятся в паспорт образца провода с указанием температуры.

Изменение температуры воды само по себе существенного влияния на результат измерения не оказывает, так как в измерителе емкости CAP-10 предусмотрена отстройка от влияния изменения электропроводности воды. Существенное влияние на результат измерения емкости провода оказывает изменение температуры изоляции провода для некоторых материалов, поэтому учет температуры воды (а следовательно, и изоляции) при проведении измерения обязателен.

5.1 Первичная настройка CAP-10

Первичная настройка измерителя емкости CAP-10 производится на этапе его изготовления. Процедура первичной настройки подразумевает определение коэффициентов функции преобразования выходного сигнала ЭЕИП в результат измерения емкости контролируемого провода с использованием отстройки от влияния изменения электропроводности воды. Алгоритм преобразования сигнала измерительной информации в значение емкости провода подробно изложен в разделе 3.2. Коэффициенты функции преобразования зависят от конструктивных параметров конкретного электроемкостного преобразователя, поэтому значения коэффициентов для каждого типа измерителя емкости рассчитываются индивидуально. Рассчитанные значения коэффициентов вводятся в программу вычислительной обработки «Сметр.ви» (раздел 4.2).

Первичная настройка проводится при изготовлении измерителя емкости в нормальных климатических условиях, регламентируемых стандартами [5, 38, 40]. ЭЕИП измерителя емкости САР-10 с контролируемым проводом, в качестве которого используется предварительно подготовленный образец провода, погружается в заземленный металлический бак, заполненный водопроводной водой известной температуры. При подключении измерителя емкости необходимо проверить качество контакта бака с заземляющим проводом. Не допускается использовать окрашенный или ржавый бак. Корректная работа измерителя емкости обеспечивается при полном погружении измерительного преобразователя в воду, при этом необходимо удостовериться, что внутреннее пространство ЭЕИП полностью заполнено водой и на поверхности провода отсутствуют пузырьки воздуха. Один конец провода заземляется, второй конец провода должен быть разомкнутым и не погруженным в воду.

Перед проведением первичной настройки образцы проводов для контроля емкости необходимо выдержать в нормальных климатических условиях не менее суток. Кроме того, после погружения ЭЕИП измерителя емкости САР-10 с контролируемым проводом внутри в воду необходимо подождать не менее 5 минут, что бы температура изоляции провода приняла значение температуры воды по всей своей толщине. Если по истечении 5 минут показания измерителя емкости САР-10 продолжают меняться (возрастать или уменьшаться), то необходимо дождаться завершения процесса установления температуры в изоляции провода. Проводить измерения можно только после того, как показания измерителя емкости САР-10 примут установившийся характер.

Для определения коэффициентов функции преобразования для измерителя емкости САР-10 осуществляется изменение емкости в диапазоне от 50 до 500 пФ/м и изменение удельной электропроводности воды в диапазоне от 0 до 4 г/л, как описано в разделе 3.2 .

5.2 «Рабочая» настройка измерителя емкости САР-10

Для проверки определения метрологических характеристик измерителя емкости требованиям технической документации предусмотрена калибровка, процедура которой описана в разделе 5.4. Если калибровка выявила, что погрешность измерения превышает 2,5 % от действительного значения емкости образцов для контроля, то в измерителе емкости предусмотрена возможность автоматизированной программной корректировки его погрешности измерения.

Корректировка погрешности измерителя емкости проводится при проведении «рабочей» настройки, которая осуществляется при установке прибора на технологической линии в условиях, соответствующих технологическому процессу охлаждения изоляции провода после экструдирования.

При проведении «рабочей настройки» ЭЕИП с контролируемым проводом внутри погружается в воду охлаждающей ванны экструзионной линии. «Рабочая» настройка измерителя емкости САР-10 проводится для исключения аддитивной и мультипликативной составляющих систематической погрешности.

Процесс подготовка «рабочей» настройки совпадает с порядком подготовки к первичной настройке (раздел 5.1). Условия проведения соответствуют условиям технологического процесса (раздел 1.4), поэтому результат измерения емкости образца провода необходимо сравнивать с его действительным значением емкости при соответствующей температуре изоляции [85].

Так как функция преобразования выходного сигнала ЭЕИП в результат измерения имеет линейный характер (глава 3), то для проведения «рабочей» настройки достаточно использовать три образца провода: со значениями емкости близкими к минимальному $C_{д1}$, пФ/м, к максимальному значению

$C_{д2}$, пФ/м, и значению $C_{д}^*$, пФ/м, (контрольный образец) в середине требуемого диапазона измерения емкости.

Измерителем емкости САР-10 измеряются значения погонной емкости для образцов с минимальным и максимальным значениями емкости провода: C_{x1} , пФ/м – значение меньшей емкости, C_{x2} , пФ/м – значение большей емкости. Измеренные значения погонной емкости могут отличаться от действительных на величины ΔC_1 и ΔC_2 , пФ/м.

Алгоритм корректировки производится с помощью стандартной операции исключения систематической погрешности, приведенной на рисунке 41.

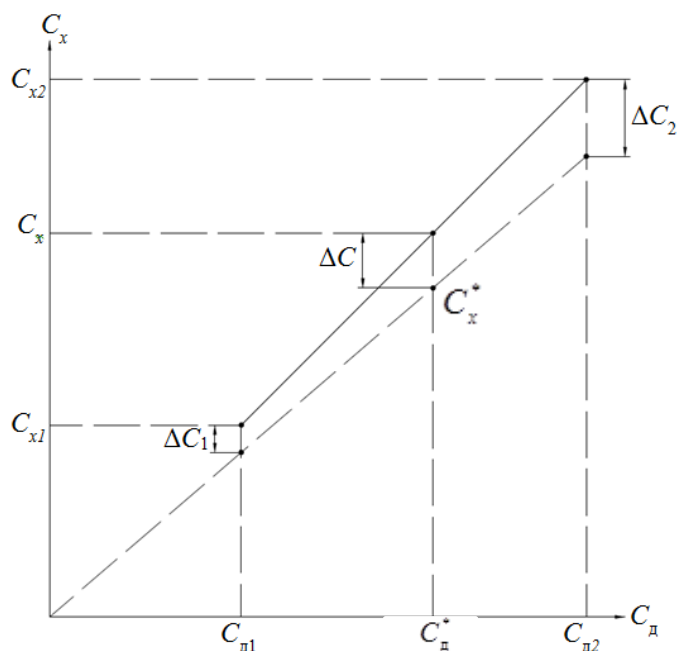


Рисунок 41 – Алгоритм корректировки измеренного значения погонной емкости

Задача «рабочей» настройки состоит в определении корректирующего значения емкости ΔC , пФ/м, на которое необходимо скорректировать результат измерения емкости C_x , пФ/м для исключения аддитивной и мультипликативной составляющих систематической погрешности.

Скорректированное значение погонной емкости C_x^* , пФ/м, для любого образца провода, рассчитывается по формуле

$$C_x^* = C_x - \Delta C. \quad (31)$$

Значения емкости ΔC , пФ/м рассчитывается по формуле:

$$\Delta C = \Delta C_1 + \frac{\Delta C_2 - \Delta C_1}{C_{x2} - C_{x1}} (C_x - C_{x1}). \quad (32)$$

Для проверки качества выполненной «рабочей» настройки используется контрольный образец провода с известным действительным значением емкости C_d , пФ/м. Измеритель емкости САР-10 измеряет емкость контрольного образца C_x , пФ/м, на индикаторе прибора отображается скорректированное значение емкости контрольного образца C_k^* , пФ/м, рассчитанное по формуле (31) при использовании вычисленного по формуле (32) значения ΔC , пФ/м.

При успешном завершении «рабочей» настройки абсолютная разница ΔC_k между скорректированным C_k^* и действительным C_{dk} значениями емкости для контрольного образца провода не должна превышать 2,5 % от его действительного значения. В противном случае процедуру «рабочей» настройки необходимо повторить. Если при повторном проведении «рабочей» настройки абсолютная разница ΔC_k превышает 2,5 % от действительного значения используемого образца провода, то необходимо провести ремонт измерителя емкости САР-10.

5.3 Реализация программной автоматизированной корректировки

Процедура «рабочей» настройки в измерителе емкости САР-10 осуществляется в автоматизированном режиме программой «Корректировка.vi», созданной в среде LabView. При ее запуске на экране персонального компьютера появляется окно «Корректировка», представленное на рисунке 42.

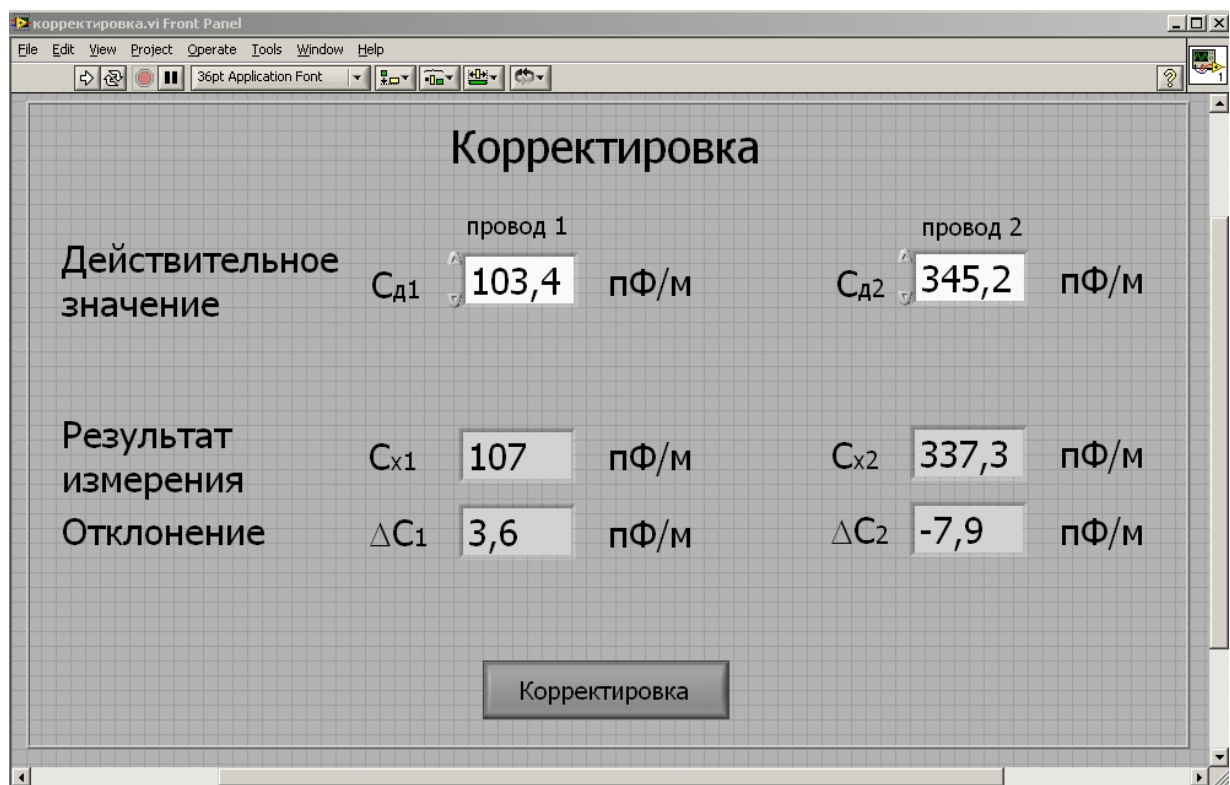


Рисунок 42 – Внешний вид панели «Корректировка»

Процедура корректировки погрешности измерения для измерителя емкости САР-10 проводится в соответствии с алгоритмом, описанным в разделе 5.2.

В ЭЕИП размещается образец провода с меньшим значением погонной емкости C_{x1} , пФ/м. С помощью цифрового элемента управления «Действительное значение» вводится действительное значение погонной емкости используемого образца провода $C_{д1}$, пФ/м. Результат измерения емкости отображается на индикаторе «Результат измерения», а на индикаторе «Отклонение» – отклонение измеренного значения емкости от действительного для данного образца провода ΔC_1 , пФ/м. Введенное $C_{д1}$ и полученные в результате измерения значения C_{x1} и ΔC_1 запоминаются программой «Калибровка.vi».

Далее вместо первого образца провода в ЭЕИП размещается второй образец с большим значением емкости C_{x2} , пФ/м, и производится измерение САР-10. С помощью цифрового элемента управления «Действительное значение» вводится действительное значение погонной емкости для второго

образца провода $C_{д2}$, пФ/м. Отклонение измеренного значения емкости от действительного значения для второго образца провода ΔC_2 , пФ/м, определяется аналогично первому. Соответствующие значения $C_{д2}$, C_{x2} и ΔC_2 , пФ/м, для второго провода также запоминаются программой «Калибровка.vi».

При нажатии кнопки «Калибровка» автоматически рассчитывается значение отклонения ΔC , пФ/м по формуле (32), которое запоминается программой «Калибровка.vi» и впоследствии отнимается от каждого измеренного значения в соответствии с формулой (31). Измеренные значения C_{x1} и C_{x2} , пФ/м для каждого из использованных образцов корректируются. По завершению работы программы «Калибровка.vi» на индикаторах «Результат измерения» должны отобразиться действительные значения емкости для каждого из двух образцов, а значения индикаторов «Отклонение» обнулиться (рисунок 43).

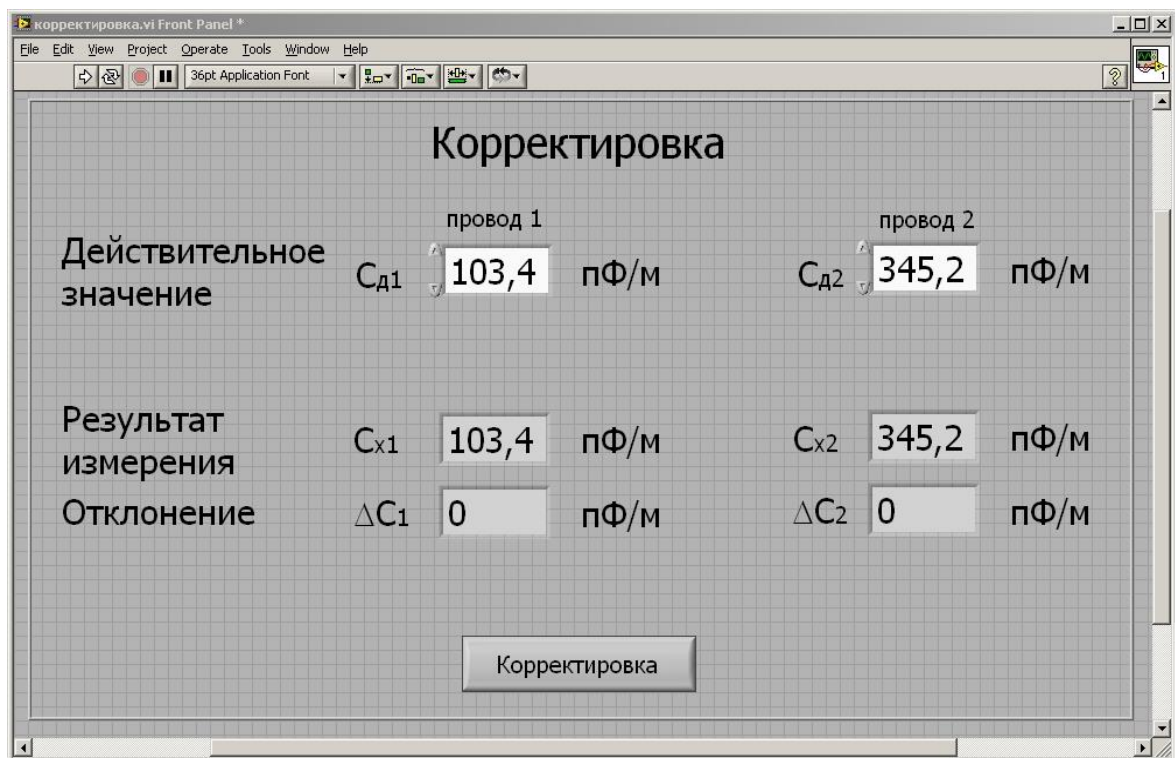


Рисунок 43 – «Рабочая» настройка успешно завершена

Для проверки качества проведения «рабочей» настройки используется третий образец провода (контрольный) со значением емкости в середине

диапазона измерения измерителя емкости САР-10, который также размещается внутри ЭЕИП, погруженного в воду. Показания измерителя емкости САР-10 не должны отличаться от действительного значения емкости контрольного образца более, чем на 2,5 %. В противном случае необходима повторная «рабочая» настройка измерителя емкости САР-10.

Методика «рабочей» настройки измерителя емкости САР-10.1 не отличается от описанной в данном разделе. Техническая реализация этой «рабочей» настройки подробно изложена в приложении Б.

5.4 Калибровка

Для определения действительных значений метрологических характеристик и пригодности измерителя емкости САР-10 при введении его в эксплуатацию, а также по истечении определенного межкалибровочного интервала предусмотрена калибровка [78]. Под пригодностью средства измерения подразумевается соответствие его метрологических характеристик ранее установленным техническим требованиям, определенным производителем или заказчиком.

Калибровка измерителя емкости выполняется периодически, не реже одного раза в год (по истечении межкалибровочного периода), а также вне очереди, например, при введении в эксплуатацию, после ремонта измерителя, после смены места установки, режима работы (запуске в производство провода другой марки), при выявлении явных погрешностей измерения в процессе эксплуатации.

Калибровка делится на следующие виды:

- *первичная калибровка* выполняется при выпуске средств измерительной техники с производства и ремонта;
- *периодическая калибровка* может быть проведена для средств измерительной техники, которые находятся в эксплуатации, продаются или сдаются на прокат. Интервал времени между двумя периодическими

калибровками называют *межкалибровочным интервалом*.

Межкалибровочный интервал устанавливается пользователем средств измерительной техники с учетом его значения, полученного при утверждении типа средств измерительной техники либо метрологической аттестации. Определяющим фактором при выборе межкалибровочного интервала является сохранение определенных (проконтролированных) метрологических характеристик в течение этого интервала времени;

- *внеочередная калибровка* проводится до окончания межкалибровочного интервала для установления метрологических характеристик средств измерительной техники [79] в случаях, когда есть подозрения в их отклонении от требований технической документации.

Первичная калибровка проводится в нормальных климатических условиях, аналогичных проведению первичной настройки.

Периодическая и внеочередная калибровки проводятся на технологической линии в условиях аналогичных проведению «рабочей» настройки.

Для проведения калибровки используются те же образцы проводов, что и при проведении первичной и «рабочей» настроек.

При калибровке проводится измерение значения САР-10 емкости образца провода с помощью измерителя емкости и сопоставление результата измерения с действительным значением емкости этого образца в условиях проведения измерений путем определения погрешности измерения. Порядок проведения калибровки не зависит от ее вида. Если при калибровке измерителя емкости САР-10 измеренное значение емкости образца для контроля C_x , пФ/м окажется отличным от действительного значения C_d , пФ/м, на величину большую допустимого отклонения Δ , пФ/м, (соответствующего значению 2,5% от действительного значения емкости провода), то необходимо провести автоматизированную «рабочую» настройку измеренного значения измерителя емкости (раздел 5.2), по завершении которой необходимо повторить калибровку. Если процедура

«рабочей» настройки не привела к желаемому результату, то необходимо провести ремонт измерителя емкости САР-10.

Порядок проведения калибровки для измерителя емкости САР-10.1 подробно изложен в приложении Б.

5.5 Выводы по главе 5

1 Для проведения первичной настройки, «рабочей» настройки и калибровки измерителя емкости САР-10 используются контрольные образцы проводов, изготовленные метрологической службой на кабельном предприятии самостоятельно.

2 Разработана методика проведения первичной настройки измерителя емкости САР-10, позволяющая получить коэффициенты функции преобразования выходного сигнала ЭЕИП в результат измерения емкости контролируемого провода с использованием отстройки от мешающих факторов.

3 Предложен механизм «рабочей» настройки, позволяющий скорректировать показания измерителя емкости САР-10 с целью исключения мультипликативной и аддитивной составляющих погрешностей измерения при измерении емкости провода.

4 Разработана автоматизированная реализация «рабочей» настройки измерителя емкости САР-10 и его модификации САР-10.1.

5 Предложена методика проведения калибровки измерителя емкости САР-10 и его модификации САР-10.1.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана конструкция измерительного преобразователя для технологического контроля погонной емкости электрического провода, позволяющая за счет подбора оптимальных конструктивных параметров обеспечить минимальную методическую погрешность измерения, обусловленную влиянием геометрических размеров провода, электрических свойств изоляции и изменения электропроводности воды.

2. Предложены и реализованы методы отстройки от влияния изменения электропроводности воды на основе определения фазы тока измерительного электрода и на основе определения тока генератора, а также алгоритмы их реализации, позволяющие уменьшить погрешность измерения погонной емкости провода до 2,5 % и 2,0 %, соответственно, в диапазоне изменения емкости от 50 до 500 пФ/м в условиях изменения солености воды от 0 до 4 г/л.

3. Предложены методика проведения первичной настройки измерителя емкости, позволяющая обеспечить требуемую функцию преобразования сигналов измерительной информации, методика «рабочей» настройки, позволяющая скорректировать результат измерения путем исключения систематической погрешности измерения, а также методика калибровки.

4. Разработаны измерители емкости провода САР-10 и САР-10.1, реализующие предложенные конструкции ЭЕИП и алгоритмы преобразования сигналов измерительной информации. Погрешность измерения разработанных приборов не превышает 2,5 % в диапазоне изменения емкости провода от 50 до 500 пФ/м в условиях изменения солености воды от 0 до 4 г/л. Проведены лабораторные и заводские испытания приборов, подтверждающие эффективность предложенных отстроек от влияющих факторов, первичной и «рабочей» настроек.

5. Показана принципиальная возможность измерителя емкости САР-10 выявлять локальные дефекты изоляции провода типа прокол, трещина и т.п., что позволит дополнить возможности электроискрового метода контроля кабельных изделий.

СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

кабельное изделие: Электрическое изделие, предназначенное для передачи по нему электрической энергии, электрических сигналов информации или служащее для изготовления обмоток электрических устройств, отличающееся гибкостью.

электрический кабель (кабель): Кабельное изделие, содержащее одну или более изолированных жил (проводников), заключенных в металлическую или неметаллическую оболочку, поверх которой в зависимости от условий прокладки и эксплуатации может иметься соответствующий защитный покров, в который может входить броня, и пригодное, в частности, для прокладки в земле и под водой.

электрический шнур (шнур): Провод с изолированными жилами повышенной гибкости, служащий для соединения с подвижными устройствами.

электрический провод (провод): Кабельное изделие, содержащее одну или несколько скрученных проволок или одну или более изолированных жил, поверх которых в зависимости от условий прокладки и эксплуатации может иметься легкая неметаллическая оболочка, обмотка и (или) оплетка из волокнистых материалов или проволоки, и не предназначенное, как правило, для прокладки в земле.

кабель (провод, шнур) связи: Кабель (провод, шнур) для передачи сигналов информации токами различных частот.

токопроводящая жила (жила): Элемент кабельного изделия, предназначенный для прохождения электрического тока.

сплошная изоляция: Изоляция в виде сплошного слоя диэлектрика (пластмассы, резины и др.) [24].

емкость электрическая: Характеристика проводника, количественная мера его способности удерживать электрический заряд. [25].

погонная (удельная) емкость: Емкость, отнесенная к единице длины кабеля или провода [26].

электропроводность: Способность тела проводить электрический ток под воздействием электрического поля [28].

удельная электропроводность: Физическая величина s , равная электропроводности цилиндрического проводника единичной длины и единичной площади сечения. [25] .

электрический неразрушающий контроль (электрический контроль): Неразрушающий контроль, основанный на регистрации параметров электрического поля, взаимодействующего с объектом контроля или возникающего в объекте контроля в результате внешнего воздействия.

электроемкостный метод контроля (электроемкостный метод): Метод электрического неразрушающего контроля, основанный на регистрации емкости участка объекта контроля [29].

качество продукции: Совокупность свойств продукции, обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением.

контроль качества продукции: Проверка соответствия показателей качества продукции установленным требованиям (производителя, заказчика, потребителя) проводится при проведении.

испытание: Экспериментальное определение количественных и (или) качественных характеристик свойств объекта испытаний как результата воздействия на него, при его функционировании, при моделировании объекта и (или) воздействий.

дефект: Каждое отдельное несоответствие продукции установленным требованиям [36].

входной контроль: Контроль продукции поставщика, поступившей к потребителю или заказчику и предназначенной для использования при изготовлении, ремонте или эксплуатации продукции.

операционный контроль: Контроль продукции или процесса во время выполнения или после завершения технологической операции.

приемочный контроль: Контроль продукции, по результатам которого принимается решение о ее пригодности к поставкам и (или) использованию .

инспекционный контроль: Контроль, осуществляемый специально уполномоченными лицами с целью проверки эффективности ранее выполненного контроля.

производственный контроль: Контроль, осуществляемый на стадии производства.

нормальные климатические условия: Значения климатических факторов внешней среды при проведении механических, электрических и других испытаний [38].

вода питьевая: Вода, в которой бактериологические, органолептические показатели и показатели токсических химических веществ находятся в пределах норм питьевого водоснабжения.

вода техническая: Вода, кроме питьевой, минеральной и промышленной, пригодная для использования в народном хозяйстве [51].

настройка: Процесс регулирования прибора с целью обеспечения соответствия прибора его технической документации [77].

автоматизированная система контроля: Система контроля, обеспечивающая проведение контроля с частичным непосредственным участием человека [38]

калибровка средства измерений: Совокупность операций, устанавливающих соотношение между значением величины, полученным с помощью данного средства измерений и соответствующим значением величины, определенным с помощью эталона с целью определения действительных метрологических характеристик этого средства измерений [78].

межкалибровочный интервал: Интервал времени между двумя периодическими калибровками [79].

измерительная информация: Информация о количественных значениях измеряемой величины, обладающая свойствами, необходимыми для принятия управляющих решений [80].

действительное значение (величины): Значение величины, полученное экспериментальным путем и настолько близкое к истинному значению, что в поставленной измерительной задаче может быть использовано вместо него [78].

ПРИЛОЖЕНИЕ А. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕЙСТВИТЕЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЕ ЕМКОСТИ ОБРАЗЦОВ ПРОВОДА

Для проверки работоспособности электроемкостного измерительного преобразователя, первичной и «рабочей» настроек, а также калибровки измерителей емкости САР-10 и САР-10.1 необходимо иметь образцы провода с известными значениями емкости, которые используются в качестве действительных.

ГОСТ 27893-88 «Кабели связи. Методы испытаний» [5] является единственным документом, регламентирующим порядок измерения емкости провода. Результаты измерения емкости, полученные в соответствии с требованиями этого ГОСТа, должны приниматься за действительные значения используемых образцов провода [78]. Анализ ГОСТа 27893-88 показывает, что в нем нет четких требований к качеству и температуре используемой для измерения воды. Кроме того рекомендуемые температурные условия проведения измерений (нормальные климатические условия [40]) варьируются в достаточно широком диапазоне (± 10 °С). Как было отмечено ранее (п. 1.4.2) при таком разбросе температуры электропроводность чистой воды (концентрация примесей $\lambda \approx 0$) может изменяться в пределах -50 % до +80 % [41, 42], что может привести к значительному изменению результата измерения емкости провода.

В связи с этим возникла необходимость определения более четких требований к условиям проведения измерений при определении значения емкости образцов провода в соответствии с требованиями ГОСТа 27893-88.

Кроме того технологический контроль емкости провода необходимо проводить непосредственно в процессе производства провода. В этом случае температурные условия могут значительно отличаться от нормальных условий, определяемых ГОСТом 27893-88. Например, в первой секции охлаждающей ванны экструзионной линии температура воды составляет (80...90) °С, во второй – (50...70) °С [37, 56]. Для охлаждающей ванны может

использоваться техническая вода, удельная электропроводность и содержание примесей которой не регламентируются [51] и могут изменяться в процессе производства. В п. 1.3.2 показано, что изменение концентрации примесей и температуры воды оказывают существенное влияние на изменение удельной электропроводности воды [40-41, 48-49]. Также следует отметить, что при увеличении температуры воды могут изменяться еще и свойства изоляции провода за счет его нагревания [34, 52- 54].

Для определения условий, при которых следует проводить измерения в соответствии с требованиями ГОСТа 27893-88 для получения значения емкости образца, которое можно принимать в качестве действительного при настройке и калибровке измерителя емкости, был проведен эксперимент.

В эксперименте использовались образцы одножильных электрических проводов с полимерной изоляцией различных марок, наносимой на токопроводящую жилу (медную или стальную) методом экструзии. В дальнейшем эти же образцы используются для проведения первичной и «рабочей» настроек измерителей емкости САР-10 и САР-10.1, а также их калибровки.

Подготовка и проведение измерения емкости соответствовали требованиям ГОСТа 27893-88 (п. 1.3.1). Металлический бак заполнялся обычной водопроводной водой без какой-либо предварительной подготовки. Длина образцов провода составляла 5 м в соответствии с требованиями ГОСТа 27893-88. Полученное значение емкости провода приводилось к единице его длины для получения значения погонной емкости.

Начальные условия эксперимента:

- температура воздуха – (27 ± 2) °С, что соответствует требованиям ГОСТа 20.57.406-81 [40];
- концентрация и состав примесей водопроводной воды соответствует требованиям СанПиНа 2.1.4.1074-01: удельная электропроводность воды не превышает – 800 мкСм/см, общая минерализация – менее 1 г/л [50];

- начальная температура воды – 30 °С.

Для проведения измерений использовался измеритель иммитанса (LCR) AM-3001 фирмы Актаком, имеющий в используемом диапазоне измерений (0,01...1) нФ погрешность не более 0,4 % [81], что соответствует требованиям ГОСТа 27893-88 [5].

Изменение электропроводности воды может произойти по трем причинам: вследствие изменения химического состава растворенных примесей, изменения концентрации одного из растворенных веществ, изменения температуры раствора. Причины изменения электропроводности воды на характер изменения результата измерения емкости провода влияния не оказывает. В описываемом эксперименте использовались два варианта изменения электропроводности – изменение температуры воды и изменение концентрации растворенной в воде примеси [82-85].

В первой части эксперимента измерение электропроводности воды обеспечивалось за счет изменения температуры водопроводной воды путем нагревания металлического бака с водой вместе с погруженным в нее образцом провода от начальных условий эксперимента до температуры закипания воды. В наших условиях вода закипала при 95 °С (определено экспериментальным путем). Значение емкости провода измерялось с шагом изменения температуры 5 °С (30, 35 ... 95 °С).

Вторая часть эксперимента проводилась по той же схеме только при использовании водопроводной воды с растворенной в ней поваренной солью NaCl концентрацией $\lambda = 4$ г/л. Это вещество было выбрано из соображений его доступности, безвредности, простоты утилизации. Кроме того, NaCl является одной из наиболее распространенных примесей, растворенных в технической воде, а электропроводность раствора этой соли при одинаковых концентрациях имеет относительно высокое значение по сравнению с другими распространенными примесями (солями) [41-48].

На рисунке 44 приведены годографы комплексного погонного сопротивления изоляции провода, приведенного к единице его длины, от

изменения температуры воды при использовании пресной (красная линия) $\lambda < 1$ г/л и соленой водопроводной воды (синяя линия) $\lambda = 4$ г/л для различных образцов провода. Пунктирными линиями показаны годографы от изменения солености воды.

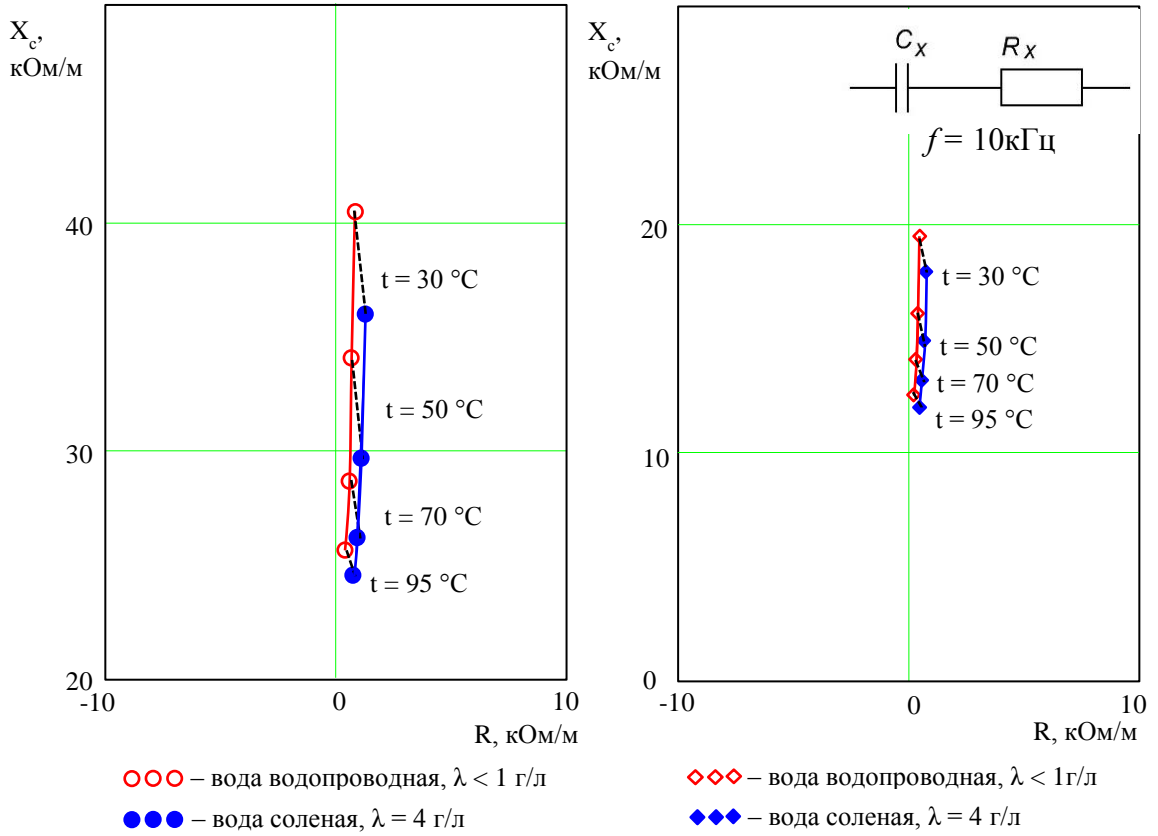
При измерении значений составляющих комплексного погонного сопротивления изоляции провода использовалась последовательная схема замещения изоляции провода (рисунок 44) при частоте $f = 10$ кГц.

Анализ полученных зависимостей показывает, что при изменении температуры воды от 30 до 95 °С в основном меняется реактивная составляющая комплексного сопротивления, имеющая емкостной характер [85].

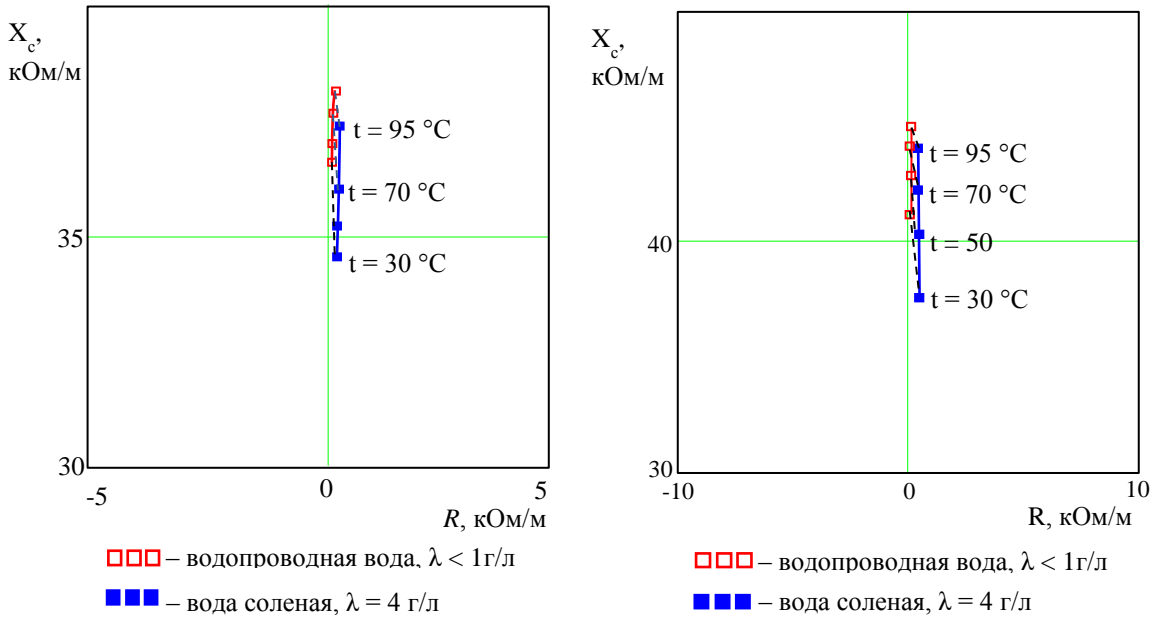
Для различных материалов изоляции характерна разная зависимость электрических свойств изоляции от изменения температуры. Изоляция проводов обычно изготавливается из полиэтилена, поливинилхлорида, фторопласта и ряда других.

Для образца провода с изоляцией из поливинилхлорида наблюдалось значительное изменение комплексного погонного сопротивления изоляции провода, причем изменение температуры оказывает более значительный вклад в этот результат измерения, чем изменение концентрации соли [82-85].

При фиксированном значении температуры воды изменение комплексного сопротивления изоляции провода из поливинилхлорида за счет изменения солености воды (от 0 до 4 г/л) составило порядка 4,5 % (при высокой температуре) и порядка 10 % (при низкой температуре). Изменение температуры воды приводило к более значительному изменению комплексного погонного сопротивления изоляции провода из поливинилхлорида – порядка -36 % при использовании чистой воды ($\lambda = 0$) и порядка -32 % при использовании соленой воды ($\lambda = 4$ г/л).



а) поливинилхлорид



б) полиэтилен

Рисунок 44 – Годографы комплексного сопротивления изоляции провода от изменения температуры воды при использовании пресной (красная линия) и соленой водопроводной воды (синяя линия)

Для проводов с изоляцией из полиэтилена влияние изменения концентрации соли и изменения температуры воды на изменение комплексного погонного сопротивления изоляции менее значительно, причем вклад обоих составляющих соизмерим. При изменении солёности воды (от 0 до 4 г/л) изменение комплексного погонного сопротивления изоляции составило порядка 1,5 % (при высокой температуре) и порядка 5 % (при низкой температуре). При изменении температуры воды это изменение составило порядка 5 % при использовании чистой воды ($\lambda = 0$) и порядка 8 % при использовании солёной воды ($\lambda = 4$ г/л).

Следует отметить, что изменение ёмкостной составляющей комплексного сопротивления может являться следствием как изменения удельной электропроводности воды (вследствие изменения температуры воды и/или концентрации в ней соли), так и изменения свойств изоляции провода при изменении температуры. Для оценки вклада каждой из указанных причин изменения ёмкостного сопротивления провода построены зависимости погонной ёмкости образцов проводов от изменения температуры (рисунок 45).

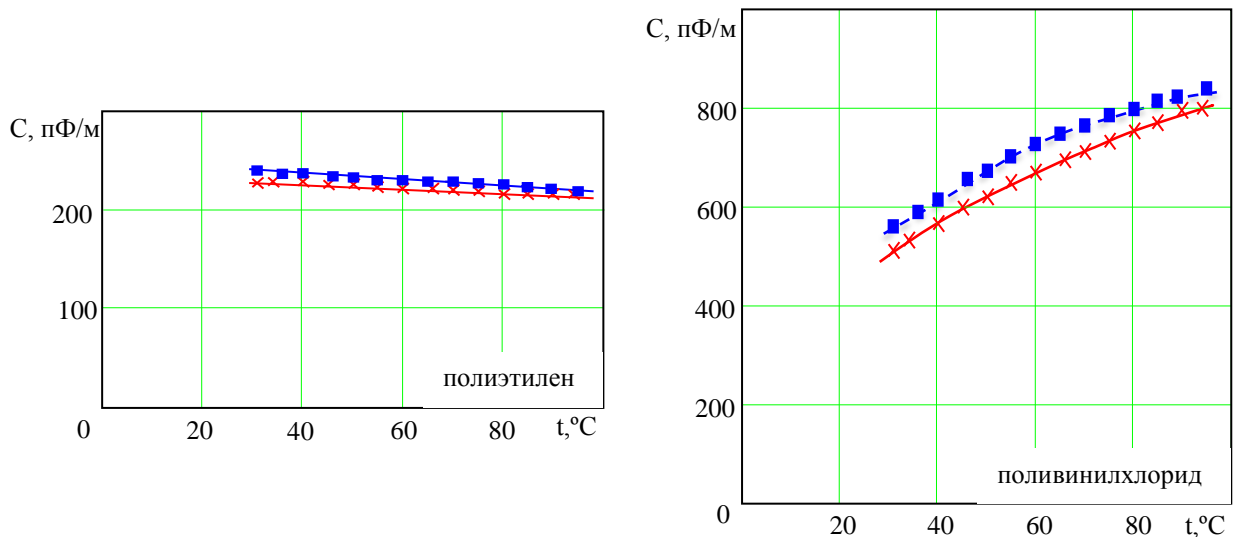


Рисунок 45 – Зависимость погонной ёмкости провода от температуры для различных материалов изоляции при использовании водопроводной воды (x x x) и солёной (■ ■ ■)

Анализ представленных зависимостей показал, что изменение температуры воды в диапазоне от 30 до 95 °С приводило к уменьшению значения емкости для образцов с изоляцией из полиэтилена на 4 % и увеличению значения емкости для образцов с изоляцией из поливинилхлорида на 56 %.

Влияние изменения концентрации соли в воде (от 0 до 4 г/л) на результат измерения емкости образцов провода с изоляцией из различных материалов одинаково: порядка 8 % при низкой температуре воды (30°С) и порядка 5 % при высокой температуре воды (95°С) для всех использованных образцов провода.

Представленные результаты показали, что при увеличении температуры воды влияние солености на результат измерения емкости провода уменьшается.

Анализ результатов проведенного эксперимента показал, что для различных материалов изоляции проводов существует разная зависимость изменения емкости провода при увеличении температуры воды, для поливинилхлорида существенно увеличивается измеренное значение емкости провода при увеличении температуры в указанном диапазоне, для полиэтилена незначительно уменьшается. Литературный обзор показывает [26, 34, 52, 54-55], что для полиэтилена изменение температуры на изменение электрических свойств материала практически не оказывает влияния, его диэлектрическая проницаемость не зависит от температуры и составляет порядка 2-3 для различных марок полиэтилена. Изоляция из полихлорвинила, наоборот, значительно подвержена действиям температуры. При увеличении температуры от 0 до 100 °С диэлектрическая проницаемость полихлорвинила увеличивается от 3 до 12 [26, 34, 52, 54-55], что приводит к значительному увеличению действительного значения емкости до 60 %. Приведенные нами результаты измерений не противоречат справочным данным.

Итак, для проведения настройки и калибровки измерителя емкости необходимо иметь образцы провода с известными действительными

значениями емкости. В качестве таковых значений можно использовать результаты измерений, проведенные по требованиям ГОСТа 27893-88 [5]. При проведении исследований было обнаружено, что результат измерения существенно зависит от концентрации примесей в воде и от температуры, как воды, так и изоляции провода. В ГОСТе 27893-88 нет рекомендации по составу воды, а предлагаемые температурные условия (нормальные климатические условия) можно выдержать только при проведении измерений в лаборатории.

Поэтому использовать полученные в соответствии с ГОСТом результаты измерения емкости в качестве действительных можно лишь при тех же условиях (при той же температуре воды и концентрации примесей).

Кроме того технологический контроль измерения емкости должен проводиться в условиях технологического процесса производства провода, условия которого значительно отличаются от нормальных как по температуре используемой воды, так и по составу и концентрации примесей в воде. Так в измерителе емкости предусмотрена отстройка от влияния изменения электропроводности воды, то прибор выдает результат измерения емкости, приведенный к нулевой солености воды и температуре при нормальных условиях. Но при изменении температуры воды также происходит изменение диэлектрической проницаемости для некоторых материалов изоляции, происходит изменение значения емкости провода при этих условиях, отстройка от которого в измерителе емкости не предусмотрена. Поэтому для сопоставления между собой других измерений емкости, необходимо чтобы условия проведения измерений были идентичны.

Для решения этого противоречия необходимо определять значения емкости образцов провода при использовании различной температуры воды, характерной при технологическом процессе изготовления электрического провода, по методике, рекомендуемой ГОСТом, и внести эти результаты в паспорт для каждого образца провода. В дальнейшем эти результаты могут быть использованы в качестве действительных при проведении «рабочей»

настройки и калибровки измерителя емкости в условиях технологического процесса при строгом соблюдении температуры проведения измерений.

В новую редакцию ГОСТа, регламентирующего методику проведения испытаний кабельных изделий, целесообразно внести более конкретные параметры условий проведения измерения емкости проводов. Например, использовать для проведения измерения емкости чистую водопроводную воду с минимальной концентрацией примесей и температурой $25\pm 2^\circ\text{C}$. Полученные результаты измерения емкости, при соблюдении указанных условий, можно будет использовать в качестве действительных при проведении настроек и калибровок измерителей емкости.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ «РАБОЧЕЙ» НАСТРОЙКИ И КАЛИБРОВКИ ДЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЯ ЕМКОСТИ CAP-10.1

«Рабочая» настройка

Порядок проведения «рабочей» настройки подробно описан в п. 5.2. В данном разделе представлена техническая реализация настройки измерителя емкости CAP-10.1. «Рабочая» настройка позволяет программно скорректировать погрешность измерения емкости используемого прибора, исключить аддитивную и мультипликативные составляющие погрешности измерения.

В соответствии с алгоритмом проведения «рабочей» настройки (рисунок 41) необходимо скорректировать как минимум две точки: в начале диапазона измерения емкости и в его конце.

Для начала процедуры корректировки результата измерения необходимо разместить внутри ЭЕИП измерителя емкости образец провода №1 с известным действительным значением емкости, затем ЭЕИП вместе с образцом провода разместить в охлаждающей ванне экструзионной линии, как описано в главе 5. Для выполнения корректировки измеренного значения емкости необходимо войти в сервисное меню.

Сервисное меню используется для внесения изменений в заводские настройки измерителя емкости CAP-10.1. Вход в сервисное меню осуществляется длительным удержанием кнопки «Режим» (рисунок 39). Навигация по пунктам сервисного меню осуществляется кратковременным нажатием кнопки «Режим». Вход в режим корректировки измеренного значения измерителя емкости CAP-10.1 производится выбором пункта сервисного меню «С-OFF» и изменением его значения на «С-On» нажатием кнопки «<<>».

Режимы корректировки измеренного значения измерителя емкости CAP-10.1 представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Режим корректировки результата измерения

№	Отображение на индикаторе	Описание параметра	Диапазон изменения	Значение по умолчанию
1	1-Out или 1-Add	Добавление первой точки корректировки (образец с наименьшей емкостью)	Out – обнуление значение предыдущей настройки. Add– добавление точки	Out
2	2-Out или 2-Add	Добавление второй точки корректировки	Out – отказ от добавления точки. Add– добавление точки	Out
3	и т.д.	Добавление следующей точки корректировки	Out – отказ от добавления точки. Add– добавление точки	Out

Для того чтобы добавить точку, соответствующую значению емкости используемого образца, необходимо клавишами «<<<» и «>>>» выбрать значение 1-Add – «добавить точку» (таблица 1) и клавишей «Режим» подтвердить свой выбор, после чего на индикаторе отобразится мигающее измеренное значение емкости используемого образца C_x , пФ/м. Очередное нажатие клавиши «Режим» фиксирует это значение в памяти измерителя емкости CAP-10.1 и на экране отображается реальное значение емкости образца провода.

Теперь необходимо добиться отображения на экране действительного значение емкости образца провода, по которому в данный момент происходит настройка. Для этого текущее значение емкости меняется клавишами «<<<» и «>>>» в меньшую или большую сторону, пока значение на индикаторе не совпадёт с действительным значение емкости используемого образца C_d , пФ/м. После установки действительного значения образца очередное нажатие клавиши «Режим» фиксирует это значение в памяти измерителя емкости CAP-10.1 и переводит его в режим корректировки для

следующего значения, где следует повторить все действия описанные выше со вторым образцом провода. Так как измеритель емкости имеет линейную функцию преобразования, то для «рабочей» настройки достаточно использовать две точки корректировки. Но их число можно увеличить, главное, чтобы значения емкости образцов провода следовали друг за другом в порядке возрастания емкости.

После подтверждения выбора клавишей «Режим» измеритель перейдет в основное сервисное меню. В это время программа измерителя емкости автоматически определяет по формуле (32) значение емкости ΔC , пФ/м, на которое необходимо скорректировать любой результат измерения емкости C_x , пФ/м. Для того чтобы результаты «рабочей» настройки вступили в силу, необходимо сохранить измененные настройки, используя режим «S-On» сервисного меню.

Калибровка

В данном разделе представлен порядок проведения калибровки для измерителя емкости САР-10.1. Процедура проведения калибровки не зависит от ее вида и проводится в порядке, представленном ниже.

После включения измерителя емкости необходимо убедиться в его работоспособности, удостовериться, что условия проведения измерений соответствуют требованиям и после этого приступить к процедуре калибровки.

Для проведения калибровки используются образцы одножильных электрических проводов длиной не менее 5 м [5] с известными действительными значениями емкости (см. приложение А). Количество образцов проводов определяется самостоятельно на каждом кабельном предприятии. Все образцы для калибровки должны быть выдержаны в условиях проведения измерений не менее 1 часа.

Образец провода №1 размещается внутри ЭИИП измерителя емкости образец провода погружается поместить в охлаждающую ванну

экструзионной линии, как описано в главе 5, далее следует выдержать время не менее 5 минут, что бы температура изоляции провода приняла температуру воды по всей своей толщине. Если по истечению 5 минут показания измерителя емкости САР-10.1 продолжают меняться (возрастать или уменьшаться), то необходимо дождаться завершения процесса установления температуры в изоляции провода. Проводить измерения можно только после того, как показания измерителя емкости САР-10.1 примут установившийся характер. В установившемся режиме цифровой индикатор «Текущая емкость» измерителя емкости САР-10.1 отображается измеренное значение C_{x1} емкости образца №1, которое необходимо внести в таблицу 2, туда же заносится и действительное значение емкости образца провода №1.

Таблица 2 – Протокол калибровки измерителя емкости САР-10.1.

№ образца (Зав. №)	Действительное значение емкости образца провода, C_d , пФ/м	Показание измерителя емкости, C_x , пФ/м	Абсолютная погрешность измерения, ΔC , пФ/м
1 (_____)			
2 (_____)			
..... (_____)			
N (_____)			

По завершении измерения емкости образца № 1 его заменяют следующим и все действия повторяют с той же последовательности. После измерения емкости последнего образца провода переходят к процедуре расчета абсолютную погрешность измерения емкости ΔC , пФ/м для каждого образца провода по формуле:

$$\Delta C = C_d - C_x, \quad (33)$$

где C_d – действительное значение емкости образца провода, пФ/м;

C_x – показания измерителя емкости, пФ/м.

Результаты расчётов заносятся в таблицу 2. При расчете абсолютной погрешности измерения по формуле (33) обязательно указывается знак погрешности.

Протокол утверждает руководитель подразделения, проводящего калибровку. При положительных результатах калибровки выдается аттестат о первичной (периодической, повторной) калибровке измерителя емкости.

Результаты калибровки считают положительными, если значения абсолютной погрешности ΔC , пФ/м из таблицы 2 не превышают заявленной паспортной погрешности (2,5 % от действительного значения емкости образца провода) калибруемого измерителя емкости. При неудовлетворительных результатах калибровки необходимо провести обслуживание и повторить процедуру «рабочей» настройки прибора (п. 5.2), после чего повторно произвести калибровку.

Результаты первичной (периодической, повторной) калибровки оформляются протоколом в соответствии с ГОСТ Р 8.568-97 [86], в который заносятся данные характеристик, полученные в процессе калибровки, значения, полученные в результате расчетов и заключение о пригодности измерителя емкости к дальнейшей эксплуатации.

ПРИЛОЖЕНИЕ В. АКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»



АКТ

«12» января 2016 № 5
г. Томск

Проверка использования результатов кандидатской диссертации
Вавиловой Галины Васильевны

Об использовании результатов диссертационной работы «Разработка методов и средств контроля погонной емкости одножильного электрического провода в процессе производства», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, в учебной и научной деятельности Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Составлен комиссией:

Председатель - зав. каф. ФМПК ИНК, А.П. Суржиков

Члены комиссии: профессор каф. ФМПК ИНК, А.В. Юрченко
доцент каф. ФМПК ИНК, И.В. Плотникова

С 28.12.2015 по 30.12.2015 комиссия провела проверку и постановила, что результаты диссертационной работы Вавиловой Г.В. внедрены в учебный процесс и используются при выполнении УИРС, НИРС и ВКР студентами ИНК ТПУ:

1. Основные результаты диссертационного исследования Вавиловой Г.В. использовались при разработке оборудования учебно-научной лаборатории "Магнитный, электрический, вихретоковый контроль". Технические решения и оборудование, разработанные диссертантом при выполнении хозяйственных работ кафедры «Физические методы и приборы контроля качества», используются при проведении лабораторных работ для бакалавров и магистров направления «Приборостроение» в рамках дисциплин «Методы неразрушающего контроля», «Неразрушающий контроль и диагностика», «Электромагнитный, радиоволновой, тепловой контроль и диагностика».

2. Разработанные при участии диссертанта Вавиловой Г.В. измерители емкости САР-10 и САР-10.1, используемые для технологического контроля погонной емкости одножильного провода, активно используются для проведения УИРС и НИРС для бакалавров и магистров направления «Приборостроение».

3. По теме диссертации Вавиловой Г.В. выполнено 3 магистерских диссертации и 5 бакалаврских ВКР, работы были представлены на Всероссийском конкурсе выпускных квалификационных работ (2014, 2015гг.). Студенты были награждены дипломами 3 степени (2014г.) и 2 степени (2015г.).

Председатель комиссии
Члены комиссии

А.П. Суржиков
И.В. Плотникова
А.В. Юрченко



ООО «НПО Редвилл». 634507, Томская обл., Томский район, п. Зональная станция, ул. Зеленая 41-70, т/ф. 8 (3822) 22-43-35 Web: www.redwill.ru, E-mail: sales@redwill.ru, Skype: hivolt, ИНН 7014052724, КПП 701401001, ОГРН 1097014001545, ОКВЭД 73.10, ОКПО 61228183, Р/сч 40702810706290004485 Банк «Томскпромстройбанк» (ОАО) г. Томск

«УТВЕРЖДАЮ»



Директор НПО «Редвилл», к.т.н.

/В.В. Редько /

2016 г.

АКТ

об использовании результатов кандидатской диссертации

Вавиловой Галины Васильевны

Комиссия в составе: председателя - директора, к.т.н. Редько В.В. и членов комиссии - главного метролога, к.т.н. Фёдорова Е.М. и ведущего программиста, к.т.н. Чурсина Ю.А. составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы «Разработка методов и средств контроля погонной емкости одножильного электрического провода в процессе производства», представленной на соискание ученой степени, использованы при выполнении следующих хозяйственных работ:

1. Х/д 5-135/13 «Разработка метода технологического контроля емкости электрических кабелей» (руководитель - Якимов Е.В., исполнитель - Вавилова Г.В.). Диссертантом предложен метод измерения погонной емкости одножильного электрического провода, позволяющий проводить технологический контроль на стадии нанесения изоляции на токопроводящую жилу провода. Реализована конструкция электроемкостного преобразователя (ЭЕИП), позволяющая обеспечить минимальную методическую погрешность измерения емкости при проведении технологического контроля погонной емкости провода. Также диссертантом разработана методика отстройки от влияния изменения электропроводности воды на результат измерения емкости и доказана эффективность использования предложенной отстройки, позволяющей уменьшить погрешность измерения погонной емкости провода в условиях значительного изменения электропроводности воды в несколько раз.

2. Х/д 5-142/15 «Разработка измерителя погонной емкости электрического провода» (руководитель - Гольдштейн А.Е., исполнитель - Вавилова Г.В.). Диссертантом предложена структурная и принципиальная схема измерителя погонной емкости САР-10, предназначенного для технологического контроля погонной емкости провода. Разработан алгоритм преобразования выходного сигнала ЭЕИП в значение емкости контролируемого провода с отстройкой от влияния изменения электропроводности провода на результат измерения емкости. Изготовлен макет измерителя емкости САР-10, проведены его лабораторные и заводские испытания, подтверждающие эффективность использования этого прибора для технологического контроля погонной емкости провода и обеспечивающего погрешность измерения не более 2,5 % в диапазоне изменения емкости провода от 50 до 500 пФ/м в условиях изменения солености воды от 0 до 4 г/л. В настоящее время идет подготовка измерителя погонной емкости САР-10 к серийному производству.

Председатель комиссии

Члены комиссии

В.В. Редько

Е.М. Фёдоров

Ю.А. Чурсин

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Городецкий С.С. Испытания кабелей и проводов: учебное пособие/ С.С. Городецкий, Р.М. Лакерник. – Москва: Энергия, 1971. – 272 с.: ил.
- 2 Саакян А.Е. Технический контроль производства кабелей, проводов и шнуров с резиновой и полихлорвиниловой изоляцией: учебное пособие/ А.Е. Саакян. – М.: Госэнергоиздат, 1957. – 239 с.: ил.
- 3 Основы кабельной техники: учебное пособие/ Под ред. В.А. Привезенцева. 2.е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1975. – 472 с.
- 4 Балашов А.И. Кабели и провода. Основы кабельной техники/ А.И. Балашов, М.А. Боев, А.С. Воронцов и др. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – 468 с.
- 5 ГОСТ 27893-88 (СТ СЭВ 1101–87). Кабели связи. Методы испытаний [Электронный ресурс]. – Введ. 1990.01.01. – с измен. 2015-01-16. – Режим доступа: URL: <http://meganorm.ru/Index/11/11797.htm>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 01.01.2015).
- 6 ANSI/UL 1581-2006 Reference Standard for Electrical Wires, Cables, and Flexible Cords (UL 1581) [Электронный ресурс]. – Введ. 2006.08.02. – Northbrook: Underwriters Laboratories Inc., – 2006 – Режим доступа: URL: <http://www.eleteck.com.cn/uploads/soft/130907/1-130ZG10P0.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ. (дата обращения 20.04.2015).
- 7 ANSI/UL 83-2008 Thermoplastic-Insulated Wires and Cables [Электронный ресурс]. – Введ. 2007.07.12 – Northbrook: Underwriters Laboratories Inc., – 2007 – Режим доступа: URL: <http://bbs.dianyuan.com/bbs/u/32/1123121473.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ. (дата обращения 20.04.2015).
- 8 ANSI/UL 2556-2012 UL Standard for Safety for Wire and Cable Test Methods [Электронный ресурс]. – Введ. 2007.19.07 – Northbrook: Underwriters Laboratories Inc., – 2012 – Режим доступа: URL:

<http://wenku.baidu.com/view/9c792b0952ea551810a6876b.html>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ. (дата обращения 20.04.2015).

9 ГОСТ 12177-79 Кабели, провода и шнуры. Методы проверки конструкции. [Электронный ресурс] – Введ. 1981.01.01. – с измен. 2015.01.16. – Режим доступа: URL: <http://www.internet-law.ru/gosts/gost/24234/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 20.08.2015).

10 ГОСТ 23286-78 Кабели, провода и шнуры. Нормы толщин изоляции, оболочек и испытаний напряжением. [Электронный ресурс] – Введ. 1981.01.01. – Измен. 2015.01.16. – Режим доступа: URL: <http://www.internet-law.ru/gosts/gost/32228/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 20.08.2015).

11 ГОСТ 4.143-85 СПКП. Изделия кабельные. Номенклатура показателей. [Электронный ресурс] – Введ. 1987.01.01. – Измен. 2015.01.16. – Режим доступа: URL: <http://meganorm.ru/Index2/1/4294852/4294852072.htm>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 20.08.2015).

12 ГОСТ 11326.0-78. Радиочастотные кабели. Общие технические условия. [Электронный ресурс] – Введ. 1981.01.01. – Измен. 2015.01.16 – Режим доступа: URL: <http://www.internet-law.ru/gosts/gost/8070/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 20.01.2015)

13 Редько В.В. Электроискровой контроль качества изоляции кабельных изделий [Электронный ресурс]: монография/ В.В. Редько – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – 928 с.: ил. – Режим доступа: URL: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext2/m/2013/m213.pdf>, доступ из корпоративной сети ТПУ. – Загл. с титульного экрана. – Яз. рус. (дата обращения 20.08.2015).

14 Ковригин Л.А. Технологические и эксплуатационные дефекты в изоляции кабелей [Электронный ресурс]/ Л.А. Ковригин //КАБЕЛЬ–news. – 2008. – №10. – с. 58-60. – Режим доступа: URL: <http://facts-plus.com/articles/technology/cables/2008.Tekhnologicheskiye.i.Ekspluatatsionnyye.Defekty.v.Izolyatsii.Kabeley.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 20.07.2015).

15 Кижяев С.А. Интеллектуальные системы измерения в процессе экструзии в кабельной промышленности/ С. А. Кижяев// Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика: журнал. – М., 2004. – № 7. – С. 52-54.

16 Глушук П.С. Система контроля качества производства кабельных изделий [Электронный ресурс]/ П. С. Глушук //Известия ТПУ/ Томский политехнический университет (ТПУ). – 2004. – Т. 307, № 3. – с. 118-121. – Режим доступа: URL: http://www.lib.tpu.ru/fulltext/v/Bulletin_TPU/2004/v307/i3/28.pdf, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 17.05.2015).

17 Лидер Х. Прошлое, настоящее, будущее. Инновации в измерительных технологиях для кабельной промышленности/ Лидер Х., Забалуев В.Ю. // Кабели и провода.– 2015. – № 1. – с. 21-23.

18 SIKORA Technology to Perfection [Электронный ресурс]/ CAPACITANCE 2000 – Режим доступа: URL: <https://www.sikora.net/ru/products/capacitance-2000/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ. (дата обращения 20.04.2015).

19 ZUMBACH Electronics [Электронный ресурс]/ CAPAC[®] / FFT / SRL – Режим доступа: URL: <http://www.zumbach.com/ru/products/product-finder/capac-fft-srl/capac-overview.html/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ. (дата обращения 20.04.2015).

20 Proton Products [Электронный ресурс]/ CAPACITANCE MEASUREMENT – Режим доступа: URL: <http://ru.protonproducts.com/products/cg-series/cg-series//>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ. (дата обращения 20.04.2015).

21 NDC Technologies [Электронный ресурс]/ CapScan – Режим доступа: URL: <http://www.betalasermike.com/index.php/en/beta-lasermike-products-en/capacitance-en/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ. (дата обращения 20.04.2015).

22 Blohm W. Advanced on-line measuring and analysis techniques for an economical cable production [Электронный ресурс]/ W. Blohm// Proceedings

Intl. IWMA Conf. Economical Processing of Rod to Wire & Cable, 18 October 1999, Singapore. – 1999. – с. 67-75. – Режим доступа: URL: https://www.sikora.net/media/publications/archiv/1999-05-26-IWMA_Duesseldorf.pdf, свободный – Загл. с экрана. – Яз. англ. (дата обращения 11.03.2015).

23 Prunk H. Latest development in measuring equipment for online quality control at the cable extrusion [Электронный ресурс]/ H. Prunk// Proceedings of the 69th Annual Convention of the Wire Association International., Atlanta – 3-4 May 1999. – Atlanta, GA, USA: Wire and Cable Technical Symposium (WCTS), 1999. – с. 378-385. – Режим доступа: URL: https://portal.wirenet.org/eweb/DynamicPage.aspx?Action=Add&ObjectKeyFrom=1A83491A-9853-4C87-86A4-F7D95601C2E2&WebCode=ProdDetailAdd&DoNotSave=yes&ParentObject=CentralizedOrderEntry&ParentDataObject=Invoice%20Detail&ivd_formkey=69202792-63d7-4ba2-bf4e-a0da41270555&ivd_cst_key=00000000-0000-0000-0000-000000000000&ivd_prc_prd_key=74B6ABC2-B0F0-483E-B542-959EB4BAE97F, свободный – Загл. с экрана. – Яз. англ. (дата обращения 11.07.2015).

24 ГОСТ 15845-80 (СТ СЭВ 585-77). Изделия кабельные термины и определения [Электронный ресурс]. – Введ. 1981.06.30 – с измен. 2015.01.16 – Режим доступа: URL: <http://meganorm.ru/Index/23/23800.htm>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 20.07.2015).

25 Физический энциклопедический словарь [Электронный ресурс]/ под ред. А.М. Прохоров. – М.: Советская энциклопедия, 1983. – 928 с.: ил. – Режим доступа: URL: http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_physics/, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 20.07.2015).

26 Справочник по электротехническим материалам: в 3 т./ под ред. Ю.В. Корицкого. – 3-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1986-1988. – Т. 1. – 368 с.

27 Большой энциклопедический политехнический словарь [Электронный ресурс]/ Сопротивление электрическое.– Режим доступа: URL: <http://enc-dic.com/polytech/Soprotivlenie-jelektricheskoe-9478.html>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 10.08.2015).

28 Каганов М.И. Электропроводность (физич.) [Электронный ресурс]// Большая Советская Энциклопедия: в 30 т./ гл. ред. А. М. Прохоров. – М.: Советская энциклопедия, 1970 – Режим доступа: URL: <http://bse.sci-lib.com/article126142.html>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 10.08.2015).

29 ГОСТ 25315-82. Контроль неразрушающий электрический. Термины и определения. [Электронный ресурс] – Введ. 1983.06.30. – с измен. 2015.01.16. – Режим доступа: URL: <http://www.internet-law.ru/gosts/gost/21777/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 01.08.2015).

30 ГОСТ 8.417-2002. Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин. [Электронный ресурс] – Введ. 2003.08.31. – Измен. 2015.01.16 – Режим доступа: URL: <http://www.internet-law.ru/gosts/gost/8435>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 20.01.2015)

31 Метрология и радиоизмерения: учебник для вузов/ под ред. В. И. Нефедова. – 2-е изд., перераб. – М.: Высшая школа, 2006. – 526 с.: ил.

32 Измерения в электронике: справочник/ под ред. В.А. Кузнецова. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 509 с.

33 Метрология и электрорадиоизмерения в телекоммуникационных системах: учебное пособие /С.И. Боридько, Н.В. Дементьев, Б.Н, Тихонов, И.А. Ходжакв. – М.: Горячая линия-Телеком, 2007. – 374 с.: ил.

34 Справочник по электротехническим материалам: в 3 т./ под ред. Ю.В. Корицкого. – 3-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1986-1988. – Т. 2. – 1987. – 464 с.

35 Иноземцев В.А. Введение в электронику [Электронный ресурс]/ В.А. Иноземцев, С.В. Иноземцева. – Брянск: Издательство БГПУ, 2001. – 150 с. – Режим доступа: URL: http://ivatv.narod.ru/vvedenie_v_elektroniku/tit_list.htm, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 10.08.2015).

36 ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. [Электронный ресурс] – Введ. 1979.07.01. – с измен. 2015.05.21. – Режим доступа: URL: <http://meganorm.ru/Index2/1/4294851/4294851954.htm>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 01.08.2015).

37 Кабели и провода. Основы кабельной техники/ А.И. Балашов, М.А. Боев, А.С. Воронцов и др. Под редакцией И.Б. Пешкова. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – 470 с.

38 ГОСТ 16504-81. Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения. [Электронный ресурс] – Введ. 1982.01.01. – с измен. 2015.01.16. – Режим доступа: URL: <http://www.internet-law.ru/gosts/gost/30125/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 01.08.2015)

39 Производство кабелей и проводов: учебник/ под ред. Н.И. Белоруссова, И. Б. Пешкова. – М.: Энергоиздат, 1981. – 632 с.: ил.

40 ГОСТ 20.57.406-81. Комплексная система контроля качества. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические. Методы испытаний [Электронный ресурс]. – Введ. 1982.01.01. – с измен. 2015.01.16. – Режим доступа: URL: <http://www.internet-law.ru/gosts/gost/1612/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 01.06.2015).

41 МУ 34-70-114-85. Методические указания по применению кондуктометрического контроля для ведения водного режима электростанций [Электронный ресурс] – Введ. 1986.01.01. – Режим доступа: URL: http://snipov.net/database/c_4294966479_doc_4294817971.html, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 10.06.2015).

42 Химический контроль на тепловых и атомных электростанциях: учебник для вузов/ под ред. О.И. Мартыновой. – М.: Энергия, 1980. – 320 с.: ил.

43 Семенов А.Д. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. – Л.: Гидрометеиздат, 1977.– 541с.

44 Дунюшкин И.И. Расчеты физико-химических свойств пластовой и промысловой нефти и воды: Учебное пособие для вузов/ И.И. Дунюшкин, И.Т. Мищенко, Е.И. Елисеева – М: ФГУП Из-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2004. – 448 с.

45 ГОСТ 6709-72. Вода дистиллированная. Технические условия. [Электронный ресурс]. – Введ. 1974.01.01 – с измен. 2015.01.16. – Режим доступа: URL: <http://www.internet-law.ru/gosts/gost/508/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 01.09.2015).

46 Кожин В.Ф. Очистка питьевой и технической воды: примеры и расчеты: учебное пособие для вузов/ В.Ф. Кожин – 4-е изд., репринтное. – Москва: Бастет, 2008. – 303 с.: ил.

47 Гидрогеология. Курс лекций Стэнфордского университета [Электронный ресурс]/ Удельная электрическая проводимость воды – Режим доступа: <http://geohydrology.ru/udelnaya-elektricheskaya-provodimost-vodyi.html>, Свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 14.07.2015).

48 o8ode.ru [Электронный ресурс]/ Расчет электропроводности воды – Режим доступа: http://www.o8ode.ru/article/answer/method/The_calculation_of_the_electrical_conductivity_of_water, Свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 18.05.2015)

49 Дамаскин Б.Б. Основы теоретической электрохимии: учебное пособие /Б.Б. Дамаскин, О.А. Петрий. – М.: Высшая школа, 1978. – 239 с.: ил.

50 СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Гигиенические требования к обеспечению безопасности

систем горячего водоснабжения. [Электронный ресурс]. – Введ. 2001.09.26 – с измен. 2010.06.28. – Режим доступа: URL: <http://www.vrednost.ru/2241191-03.php/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 19.06.2015).

51 ГОСТ 17.1.1.04-80 Охрана природы. Гидросфера. Классификация подземных вод по целям водопользования [Электронный ресурс]. – Введ. 1981.06.30. – с измен. 2015.01.16.– Режим доступа: URL: <http://www.internet-law.ru/gosts/gost/14373/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 01.06.2015).

52 Григорьян А.Г. Технология производства кабелей и проводов с применением пластмасс и резин/ А.Г. Григорьян, Д.Н. Дикерман, И.Б. Пешков. – М.: Машиностроение. 2011. – 368 с.

53 Пешков И.Б. Материалы кабельного производства/ И.Б. Пешков. – М.: Машиностроение. 2013. – 456 с.

54 Производство электрических кабелей и проводов с резиново-пластмассовой изоляцией: учебное пособие/ И.Д. Троицкий [и др.]. – М.: Высшая школа, 1967. – 400 с.: ил.

55 Крыжановский В.К. Технические свойства пластмасс: учебное пособие для вузов / В.К. Крыжановский. – Санкт-Петербург: Профессия, 2014. – 246 с.: ил.

56 Канискин В.А. Основы кабельной техники: учебное пособие / В.А. Канискин, Б.И. Сажин; Ленинградский политехнический институт им. М. И. Калинина (ЛПИ). – Ленинград: Изд-во Ленинградского технологического ин-та, 1990. – 86 с.: ил.

57 PLASTINFO [Электронный ресурс]/ Применение полимерных материалов в кабельной промышленности – Режим доступа: URL: <http://plastinfo.ru/information/articles/170/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 19.06.2015).

58 Черневский И.Н. Чувствительность и компенсация погрешностей емкостных датчиков для контроля кабельных изделий/ И.Н. Черневский// Автоматизация контроля и регулирования в кабельной промышленности. –

Кишенев, КишНИИ Электропроборостроения. – 1966. – выпуск 2. – с. 164-169.

59 Town, W.L. A review of eccentricity, capacitance and diameter gauges for continuous observation and recording of cable quality during manufacture //Proceedings of the IEE: Part A: Power Engineering. – 1962. – Т. 109. – №3. – с. 151-162.

60 Самосудов П.А. Методы и приборы, применяемые для контроля конструктивных размеров проводов и кабелей/ П.А. Самосудов// Автоматизация контроля и регулирования в кабельной промышленности. – Кишенев, КишНИИ Электропроборостроения. – 1966. – выпуск 2. – с. 139-163.

61 Патент № 3812424 US, МПК G01R27/26. Capacitive wire gauge [Электронный ресурс]/ Robert C. Abbe; заявл. 15.05.1973; опубл. 21.05.1974. – № 341543. – Режим доступа: URL: http://www.worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?DB=EPODOC&II=0&ND=3&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=19740521&CC=US&NR=3812424A&KC=A, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ. (дата обращения 11.04.2015).

62 Патент № 0394525 EP, МПК G01R31/02. Method and apparatus for the contactless checking of the insulation of insulated electric conductors and for the detection and classification of insulation faults [Электронный ресурс]/ Martin Richter; заявл. 27.04.1989; опубл. 31.10.1990. – № 89107227.5. – Режим доступа: URL: http://www.worldwide.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument?CC=EP&NR=0394525A1&KC=A1&FT=D&ND=3&date=19901031&DB=EPODOC&locale=en_EP, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ. (дата обращения 11.04.2015).

63 Пат. № 2358928 GB, МПК G01B 7/06. A system for monitoring fluctuations in the thickness of a cable insulating sheath [Электронный ресурс] / Patrick Fleming, Lee Robert Coleman.; заявл. 04.02.2000; опубл. 08.08.2001. - № 0002487.7. – Режим доступа: URL:

http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?DB=EPODOC&II=4&ND=3&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=20010808&CC=GB&NR=2358928A&KC=A, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ. (дата обращения 17.04.2015).

64 Пат. № 20030128038 US, МПК G01R 27/26. Capacitance monitoring systems [Электронный ресурс]/ Patrick Fleming, Lee Robert Coleman.; заявл. 25.01.2001; опубл. 10.07.2003. - № 10/182766. – Режим доступа: URL:

http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?DB=EPODOC&II=2&ND=3&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=20030710&CC=US&NR=2003128038A1&KC=A1, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ. (дата обращения 17.04.2015).

65 Пат. № 6498499 US, МПК G01R 27/26. Device for measuring the capacitance of electrical wires [Электронный ресурс]/ Harald Sikora; заявл. 19.02.1999; опубл. 24.12.2002. – № 09/253188. – Режим доступа: URL: http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?CC=US&NR=6498499B1&KC=B1&FT=D&ND=3&date=20021224&DB=EPODOC&locale=en_EP, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ. (дата обращения 17.04.2015).

66 Гольдштейн А.Е. Отстройка от влияния изменения электропроводности воды на результаты технологического контроля погонной емкости электрического кабеля/ А.Е. Гольдштейн, Г.В. Вавилова// Ползуновский вестник. – 2013. – № 2. – с. 146-150.

67 Гольдштейн А.Е. Технологический контроль погонной емкости электрического кабеля в условиях значительных изменений солености воды/ А.Е. Гольдштейн, Г.В. Вавилова// Контроль. Диагностика: научно-технический журнал / Российское общество по неразрушающему контролю и технической диагностике. – 2013. – № 9. – с. 57-60.

68 Гольдштейн А.Е. Электроемкостный измерительный преобразователь для технологического контроля погонной емкости электрического кабеля в процессе производства/ А.Е. Гольдштейн, Г.В. Вавилова, В.Ю. Белянков// Дефектоскопия. – 2015. – № 2. – с. 35-43.

69 Goldshtein A.E. An electro-capacitive measuring transducer for the process inspection of the cable capacitance per unit length in the process of production/ A.E. Goldshtein, G. V. Vavilova, V.Yu. Belyankov// Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2015. – Т 51. – Выпуск 2. – с. 35-43.

70 Гольдштейн А.Е. Оптимизация конструктивных параметров электроемкостного преобразователя измерителя погонной емкости электрического кабеля/ А.Е. Гольдштейн, Г.В. Вавилова// Ползуновский вестник. – 2014 – №. 2. – с. 71-76.

71 Вавилова Г.В. Моделирование электроемкостного измерительного преобразователя для контроля погонной емкости электрического кабеля в процессе производства [Электронный ресурс]/ Г.В. Вавилова, А.В. Чапайкина// Вестник науки Сибири: электронный научный журнал/ Томский политехнический университет. – 2014. – № 4 (14). – с. 44-52. – Режим доступа: URL: <http://sjs.tpu.ru/journal/article/view/1090/708>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. Рус.

72 Детлаф А.А. Курс физики [Электронный ресурс]: учебник в электронном формате/ А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – 9-е изд. стер. – Мультимедиа ресурсы (10 директорий; 100 файлов; 740МВ). – Москва: Академия, 2014. – Режим доступа: URL: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext2/m/2015/FN/fn-30.pdf>, доступ из корпоративной сети ТПУ – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 01.08.2015).

73 Говорков В.А. Электрические и магнитные поля/ В. А. Говорков. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Энергия, 1968. – 487 с.: ил.

74 Чапайкина А.В. Исследование влияния концентрации соли на результат измерения погонной емкости кабеля [Электронный ресурс]/

А.В. Чапайкина, Г.В. Вавилова // Вестник науки Сибири: электронный научный журнал/ Томский политехнический университет. – 2013. – № 4 (10). – с. 72-76. – Режим доступа: URL: <http://sjs.tpu.ru/journal/article/view/815/573>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. Рус. (дата обращения 01.08.2015).

75 Гольдштейн А.Е. Измеритель погонной емкости одножильного провода для технологического контроля/ А.Е. Гольдштейн, Г.В. Вавилова// Ползуновский вестник. – 2015. – № 3. – с. 38-42.

76 Goldstein A. Device CAP-10 for in-process measurement of the single-core wire capacitance per unit length/ A. Goldstein, G. Vavilova //Recent advances on systems, Signals, control, communications and computers: proceedings of the 7th international conference on sensors and signals (SENSIG '15)», Budapest, Hungary, 12-14 декабря 2015. – WSEAS Press, 2015 – с. 272-277.

77 ГОСТ Р 51288-99. Средства измерений электрических и магнитных величин. Эксплуатационные документы. [Электронный ресурс]. – Введ. 2000.06.30 – с измен. 2015.01.16. – Режим доступа: URL: <http://www.internet-law.ru/gosts/gost/7027/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 19.09.2015).

78 РМГ 29-2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения. [Электронный ресурс]. – Введ. 2015.01.01 – Режим доступа: URL: <http://meganorm.ru/Index2/1/4293772/4293772305.htm>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 10.11.2015).

79 РД 34.11.412-96. Методические указания. Калибровка средств измерений на энергопредприятиях электроэнергетики. Организация и порядок проведения. [Электронный ресурс]. – Введ. 1997.01.01 – Режим доступа: URL: http://www.znaytovar.ru/gost/2/RD_341141296_Metodicheskie_uka.html, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 10.10.2015).

80 ГОСТ Р 8.820-2013 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Метрологическое обеспечение. Основные положения [Электронный ресурс] – Введ. 2015.01.01. – Режим доступа: URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200107589>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 20.11.2015).

81 АКТОКОМ [Электронный ресурс]/ АМ-3001 Измеритель иммитанса – Режим доступа: URL: http://www.aktakom.ru/kio/index.php?ELEMENT_ID=7194, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 10.12.2015).

82 Мазиков С.В. Влияние температуры воды на результат измерения емкости кабеля по ГОСТ 27893-88 [Электронный ресурс]/ С.В. Мазиков// Ресурсоэффективным технологиям – энергию и энтузиазм молодых: сборник научных трудов VI Всероссийской конференции, Томск, 22-24 Апреля 2015. – Томск: ТПУ, 2015 – с. 330-332. – Режим доступа: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2015/C08/C08.pdf> – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 25.11.2015).

83 Мазиков С. В. Особенности измерения емкости кабеля по ГОСТ 27893-88// Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее: сборник научных трудов III Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых. В 4-х томах, Томск, 6-11 Октября 2014 – Томск: ТПУ, 2014 – Т. 1 – с. 142-145

84 Мазиков С.В. Измерение погонной емкости кабеля в соответствии с ГОСТ 27893-88 в условиях значительного изменения электропроводности воды/ С.В. Мазиков, Г.В Вавилова// Неразрушающий контроль: сборник трудов V Всероссийской научно-практической конференции «Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность». В 2 т., Томск, 25-29 Мая 2015. – Томск: ТПУ, 2015 – Т. 1 – с. 298-302.

85 Мазиков С.В. Определение действительного значение погонной емкости образцов провода [Электронный ресурс]/ С.В. Мазиков, Г.В.

Вавилова// Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее: сборник научных трудов IV Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых в 3 т. – 2015. – Т. 1. – Томск: Изд-во ТПУ. – с.131-135. – Режим доступа: URL: http://portal.tpu.ru:7777/science/konf/resurs/proceedings/Сборник%20трудов'15%20Т.1_3.pdf, свободный – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 25.11.2015).

86 ГОСТ Р 8.568-97. Государственная система обеспечения единства измерений. Аттестация испытательного оборудования. Основные положения. [Электронный ресурс] – Введ. 1998.06.30.– Измен. 2015.01.16 – Режим доступа: URL: <http://www.internet-law.ru/gosts/gost/791/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 20.01.2015).