

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2016

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

Научный руководитель: Гольдштейн Александр Ефремович
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Чухланцева Марина Михайловна,
кандидат технических наук,
Федеральное бюджетное учреждение
«Государственный региональный центр
стандартизации, метрологии и испытаний
в Томской области», директор

Бирюков Сергей Владимирович,
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Омский государственный технический
университет», профессор кафедры физики

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Алтайский государственный
технический университет им.
И.И. Ползунова», г. Барнаул

Защита состоится «12» апреля 2016 г. в 15:00 на заседании
диссертационного совета Д 212.269.09 при ФГАОУ ВО НИ ТПУ по адресу:
Россия, 634050, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке
ФГАОУ ВО НИ ТПУ по адресу: 634050, г. Томск, ул. Белинского, 55 и на сайте
<http://portal.tpu.ru/council/916/worklist>

Автореферат разослан «25» февраля 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



Е.А. Васендина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Кабельные изделия широко применяются в различных сферах, и во многих случаях их качество определяет надежность работы и стоимость изделий и оборудования, в которых они используются.

Проведение контроля в ходе технологического процесса производства на стадии нанесения изоляции на электропроводящую жилу может повысить качество выпускаемых кабельных изделий за счет осуществления контроля параметров по всей длине изделия и получения информации о его качестве еще в процессе изготовления, что позволяет обеспечить до 100 % выхода годной продукции.

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.

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 погонную 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.

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). 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.

Приборы для контроля емкости провода должны 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 позволяют 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 позволяют 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

конференция с международным участием «Информационно-измерительная техника и технологии» (г. Томск, 2014 г., 2015 г.).

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 электроемкостного 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, 46 рисунков, 2 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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 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. Значение емкости провода определяется по силе тока, протекающего через

измерительный трубчатый электрод, при известных амплитуде и частоте приложенного к электроду гармонического напряжения.

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 (рисунок 1) электроемкостного измерительного преобразователя (ЭЕИП), используемого для измерения емкости одножильного электрического провода в процессе его производства. 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. Дополнительные электроды используются для обеспечения однородности электрического поля на краях измерительного электрода. Электропроводящая жила провода и корпус преобразователя соединены с общей точкой (землей). Электроды преобразователя подключаются к генератору 8 гармонического напряжения $U_m \sin \omega t$ с известными амплитудой U_m и частотой ω . Измерительный преобразователь и провод погружаются в воду охлаждающей ванны (на рисунке не показана).

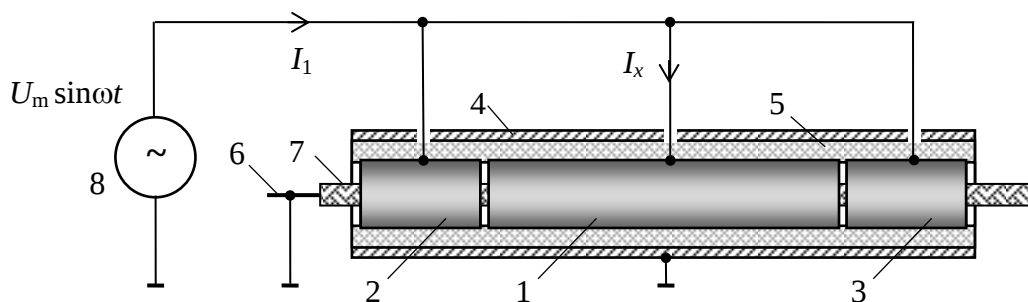
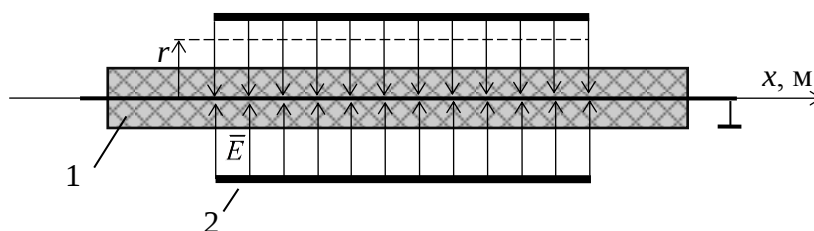


Рисунок 1 – Конструкция электроемкостного измерительного преобразователя

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. 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.

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 2).



1 – провод; 2 – измерительный электрод

Рисунок 2 – Поле внутри измерительного преобразователя

Оптимальность конструкции преобразователя оценивается степенью приближения к единице отношения значений погонной емкости C_p , 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):

$$\beta = \frac{C_n}{C_0}. \quad (1)$$

На рисунке 3а эквипотенциальными линиями и цветовым спектром показано распределение электрических потенциалов при взаимодействии электрического поля преобразователя и контролируемого провода для случая наличия дополнительных электродов радиуса R (равного внутреннему радиусу измерительного электрода), длиной $1R$ и зазора 1 мм.

Рисунок 3б показывает распределение значений продольной E_x , В/м и радиальной E_r , В/м, пространственных составляющих вектора напряженности электрического поля преобразователя вдоль продольной оси в средней части оболочки провода.

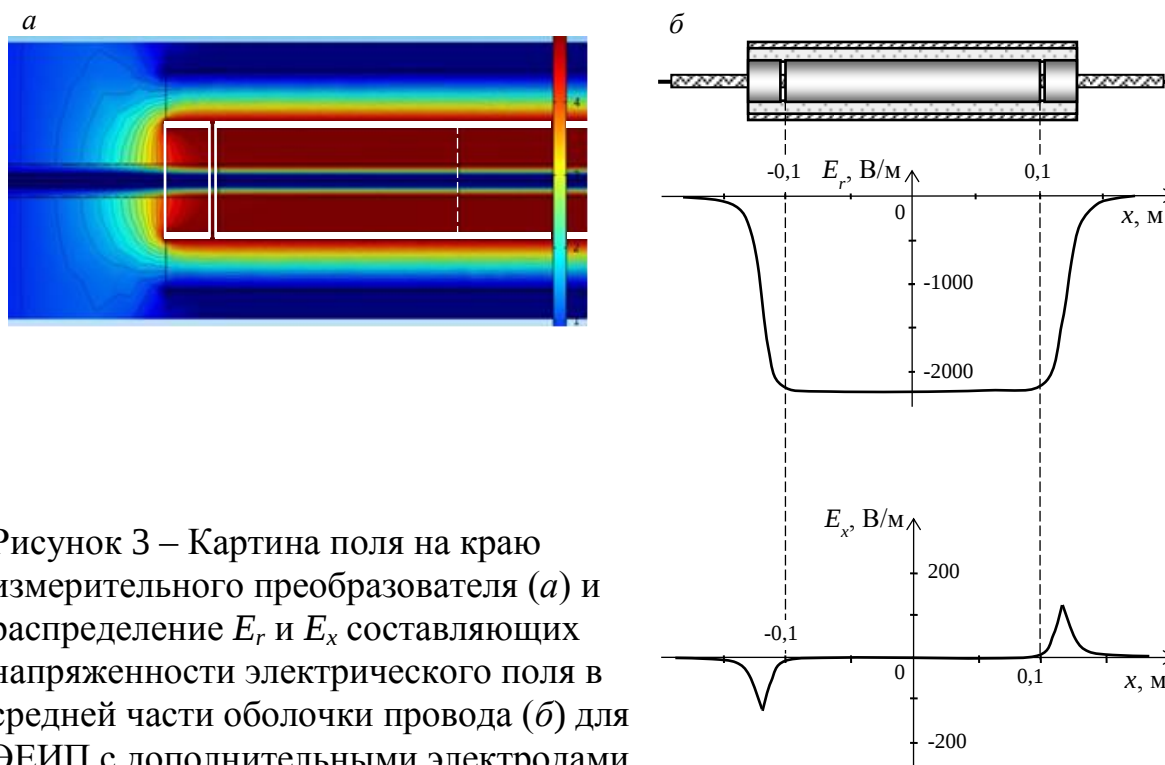


Рисунок 3 – Картина поля на краю измерительного преобразователя (а) и распределение E_r и E_x составляющих напряженности электрического поля в средней части оболочки провода (б) для ЭИП с дополнительными электродами

В этом случае «растекание» электрического поля выносится к дальним относительно измерительного электрода краям дополнительных электродов, что обеспечивает высокую однородность поля в продольном направлении в зоне измерения.

На основе исследования влияния на распределение электрических потенциалов при взаимодействии электрического поля преобразователя и контролируемого провода характеристик ЭИП (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...1) R и зазор (1...3) мм.

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.

Третья глава посвящена разработке алгоритма преобразования выходного сигнала используемого ЭЕИП в значение емкости контролируемого провода, обеспечивающего минимизацию влияния основных мешающих факторов.

Емкость провода C_n , пФ/м может быть определена при использовании линейной функции преобразования вида:

$$C_n = C_0 + k \cdot I_x \quad (2)$$

где I_x , мА – сила тока в цепи измерительного электрода;

C_0 , пФ/м, и k , пФ/(м·А) – постоянная составляющая и коэффициент пропорциональности, значения которых зависят от конструктивных параметров преобразователя.

Алгоритм преобразования выходного сигнала определяется на основе экспериментального исследования, проводимого с использованием ЭЕИП. Конструктивные параметры этого преобразователя подобраны с помощью компьютерного моделирования и имеют следующие значения: 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.

На рисунке 4 представлены результаты экспериментальных исследований влияния изменения удельной электропроводности воды на результат измерения емкости в виде годографов относительного значения тока $\dot{I}_x$ от изменения погонной емкости провода C_n , пФ/м (сплошные линии) и весовой концентрации соли λ , г/л (пунктирные линии). Для исследования 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 «Кабели связи. Методы испытаний» при комнатной температуре $+(22 \pm 1)^\circ\text{C}$ и при использовании чистой водопроводной воды той же температуры.

Анализ представленных результатов показывает, что без учета влияния изменения электропроводности воды погрешность измерения емкости провода в данном диапазоне изменения влияющих факторов может достигать 20 %.

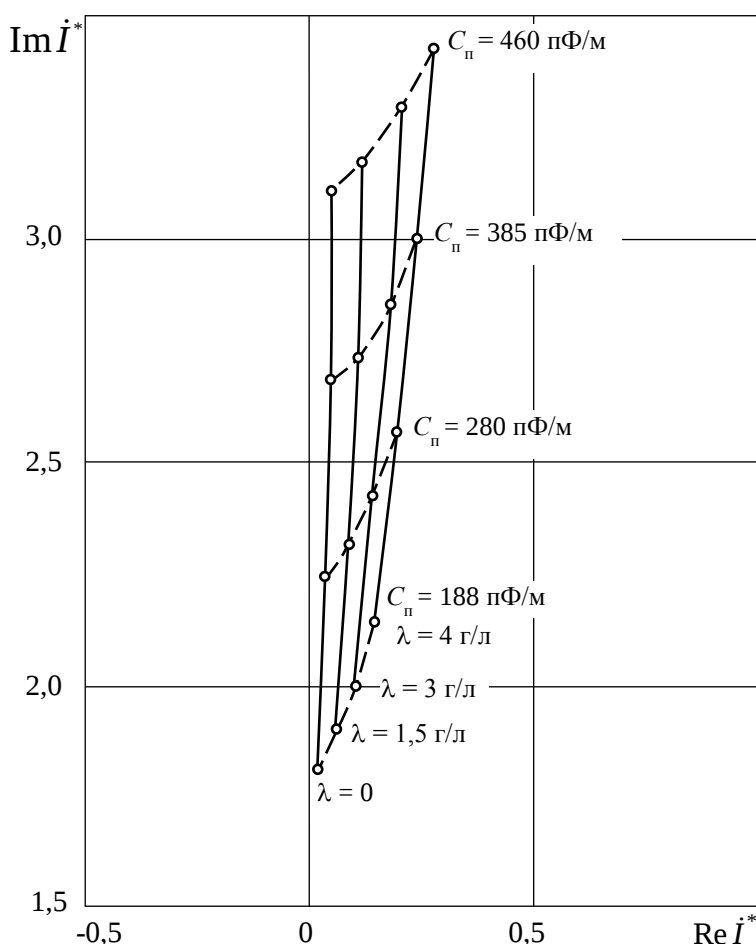


Рисунок 4 – Годографы сигнала электроемкостного преобразователя от изменения погонной емкости электрического провода C_{π} , пФ/м, и весовой концентрации соли λ , г/л

Для устранения этого влияния можно использовать методику отстройки от влияния изменения электропроводности на результат измерения емкости, основанную на измерении фазы тока измерительного электрода. Как видно из графика (Рисунок 4), отношение $t = \text{Re } \dot{I}^* / \text{Im } \dot{I}^*$, равное $\text{tg } \varphi$, монотонно возрастает при увеличении удельной электропроводности воды (φ – угол между вектором тока и мнимой осью комплексной плоскости). Следовательно, для отстройки от изменения электропроводности воды можно использовать результаты измерения комплексных составляющих тока $\dot{I}^*$. Отстройка заключается в замене величин C_0 , пФ/м, и k , пФ/(м·А) в функции (2), соответствующих фиксированному значению электропроводности (например, при $\lambda \rightarrow 0$), на соответствующие функции $C_{01}(t)$, пФ/м и $k_1(t)$, пФ/(м·А), которые с достаточной степенью приближения могут быть описаны полиномами второй степени, коэффициенты которых определяются конструктивными параметрами используемого ЭЕИП и находятся экспериментально при первичной настройке измерителя емкости:

$$C_{\pi} = C_{01}(t) + k_1(t) \cdot I_x. \quad (3)$$

Экспериментальные исследования доказывают высокую эффективность метода отстройки от влияния изменений электропроводности воды,

основанного на измерении фазы измеряемого тока. Однако данный метод отстройки может оказаться недостаточно эффективен 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 изоляции провода C_x , пФ/м, и R_x , кОм/м. Кроме того, в этом случае невозможен раздельный контроль данных электрических параметров, что ограничивает информативность контроля.

В этом случае можно использовать 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 (Рисунок 1). Значение тока I_1 практически линейно связано со значением электропроводности воды. Корректировка функциональной зависимости (2) заключается в замене значений величин C_0 , пФ/м, и k , пФ/(м·А), соответствующих фиксированному значению электропроводности (например, при $\lambda \rightarrow 0$), на их скорректированные значения $C_{02}(I_1)$ и $k_2(I_1)$:

$$C_{\pi} = C_{02}(I_1) + k_2(I_1) \cdot I_x, \quad (4)$$

где $C_{02}(I_1)$, пФ/м и $k_2(I_1)$, пФ/(м·А), – постоянная составляющая и коэффициент пропорциональности, являющиеся функциями величины I_1 , которая отражает электропроводность воды. Функции $C_{02}(I_1)$ и $k_2(I_1)$ с достаточной степенью приближения могут быть описаны полиномами второй степени, коэффициенты которых зависят от конкретных конструктивных параметров измерительного преобразователя и определяются экспериментально при первичной настройке измерителя емкости.

Эффективность использования предложенных отстроек показана на рисунке 5 в виде диаграммы интервалов 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 (3) – серый цвет заливки и с использованием отстройки по формуле (4) – заливка косой штриховкой.

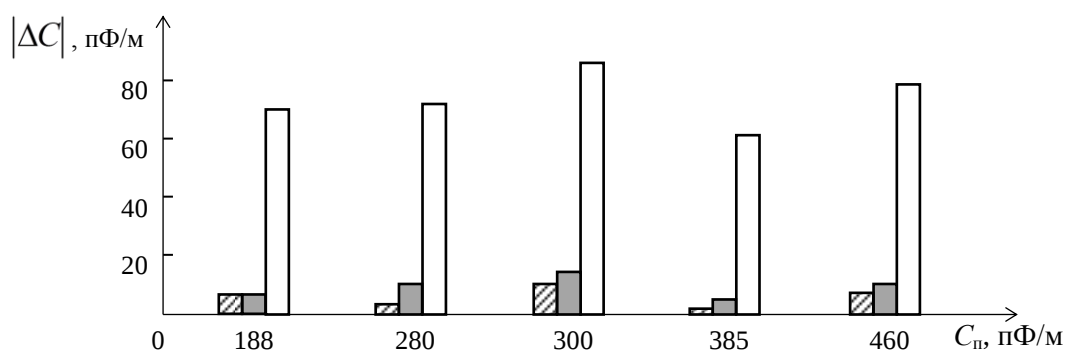


Рисунок 5 – Интервалы изменений абсолютных погрешностей $|\Delta C|$ измерения погонной емкости $C_{\text{п}}$ в условиях изменения солености воды от 0 до 4 г/л для различных образцов провода

Четвертая глава посвящена описанию разработки и реализации измерителя емкости САР-10. На рисунке 6 приведена его структурная схема, которая состоит из генератора, 1 гармонического напряжения $U_m \sin \omega t$, ЭЕИП 2, блока аналогового преобразования 6, устройства сопряжения 7, блока вычислительной обработки 8, блока визуализации 9. 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.

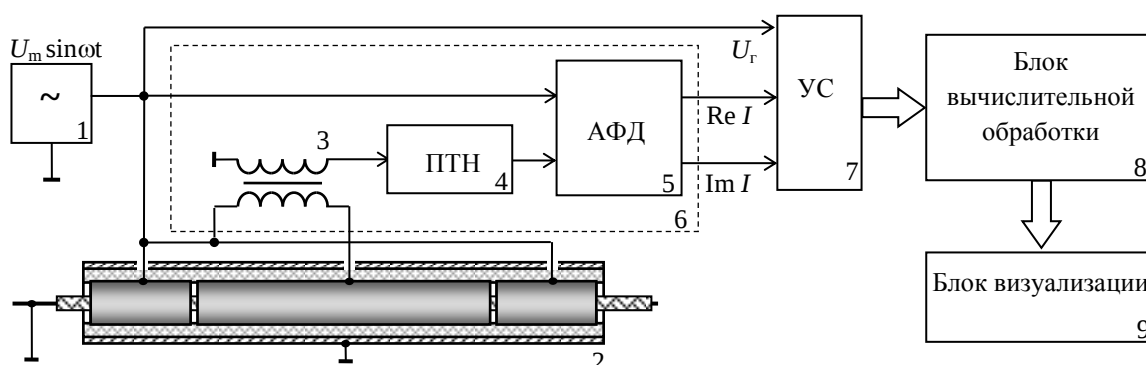


Рисунок 6 – Структурная схема измерителя емкости САР-10

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, которым 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. 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 вычислительная обработка сигналов измерительной информации в соответствии с алгоритмом преобразования, описанном в главе 3. Блок визуализации 9 предназначен для представления измерительной информации в удобном для оператора виде.

Измеритель емкости CAP-10 может реализовывать два вида отстройки от влияния изменения электропроводности воды: на основе определения фазы тока измерительного электрода ЭЕИП и на основе определения тока генератора. Основным видом отстройки при реализации измерителя емкости является отстройка на основе измерения фазы тока измерительного электрода ЭЕИП. Другую отстройку, основанную на измерении тока I_1 , мА генератора 6 (Рисунок 1), 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 изоляции провода C_x , пФ/м, и R_x , кОм.

На рисунке 7 представлен внешний вид макета измерителя емкости CAP-10 и его лицевая панель.

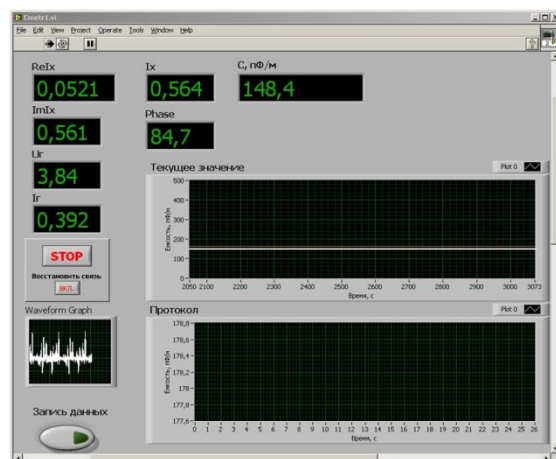


Рисунок 7 – Внешний вид макета измерителя емкости CAP-10 и его лицевая панель

При открытии программы «Сметр.ви» появляется лицевая панель виртуального прибора (Рисунок 7), 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_r » и « I_r » на цифровых индикаторах;

- рассчитанное 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 «C, 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.

Измеритель емкости CAP-10 предназначен для измерения значений погонной емкости одножильного провода и для записи массива данных значений погонной емкости за заданный интервал времени.

Основные технические характеристики измерителя емкости CAP-10:

- объект контроля: одножильный изолированный провод;
- диапазон измеряемой погонной емкости: (50...500) пФ/м;
- наружный диаметр изоляции провода: (0,5...12) мм;
- максимально допустимая погрешность измерения погонной емкости 2,5 % от номинального значения в диапазоне изменения электропроводности воды эквивалентной изменению концентрации соли NaCl в диапазоне (0...4) г/л.

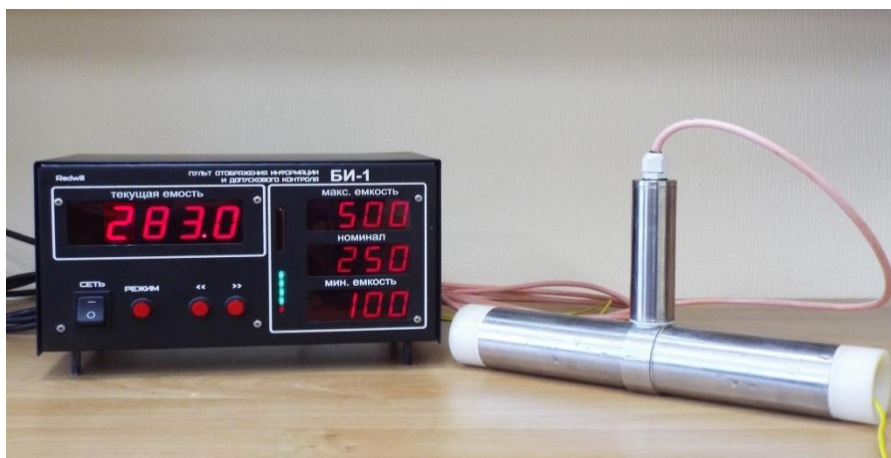
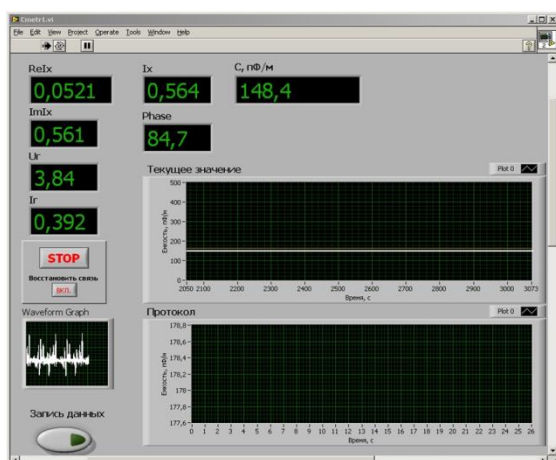


Рисунок 8 – Внешний вид прототипа измерителя емкости CAP-10.1

На сегодняшний день измеритель емкости готовится к серийному производству. Для этого изготовлен прототип прибора CAP-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. Внешний вид прототипа измерителя емкости CAP-10.1 представлен на рисунке 8.

Кроме основной функции контроля емкости провода измеритель емкости САР-10 выполняет функцию непрерывного контроля на наличие локальных дефектов в изоляции провода, таких, как прокол, трещина, инородное включение и т.п. Так как при наличии локального дефекта в изоляции провода наблюдается резкое, скачкообразное изменение емкости провода за счет резкого изменения геометрических размеров и электрических свойств изоляции, измеритель емкости можно использовать для обнаружения подобных дефектов. На рисунке 9 показана реакция измерителя емкости САР-10 при обнаружении дефекта. Представленная возможность измерителя емкости позволяет расширить сферу его применения и дополнить возможности дефектоскопии с помощью электроискрового метода контроля в кабельной промышленности.



Нет дефектов



Дефект обнаружен

Рисунок 9 – Применение измерителя емкости для обнаружения локальных дефектов изоляции провода

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

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

Для проведения первичной настройки, «рабочей» настройки и калибровки измерителя емкости САР-10 используются 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. Алгоритм преобразования сигнала

измерительной информации подробно изложен в главе 3. Коэффициенты функции преобразования зависят от конструктивных параметров конкретного электроемкостного преобразователя, поэтому значения коэффициентов для каждого типа измерителя емкости рассчитываются индивидуально.

Если при установке измерителя емкости на технологической линии (впервые или после ремонта), а также в процессе его эксплуатации обнаруживается отклонение показаний прибора от действительного значения образца провода более, чем на 2,5 % от его действительного значения, то результат измерения можно скорректировать (исключить систематическую погрешность измерения) путем проведения «рабочей настройки».

Задача «рабочей» настройки состоит в определении значения емкости ΔC , пФ/м, на которое необходимо скорректировать показания измерителя емкости САР-10 C_x , пФ/м для исключения аддитивной и мультипликативной составляющих систематической погрешности:

$$\Delta C = \Delta C_1 + \frac{\Delta C_2 - \Delta C_1}{C_{x2} - C_{x1}} (C_x - C_{x1}). \quad (5)$$

Алгоритм корректировки производится с помощью стандартной операции исключения систематической погрешности в соответствии с рисунком 10.

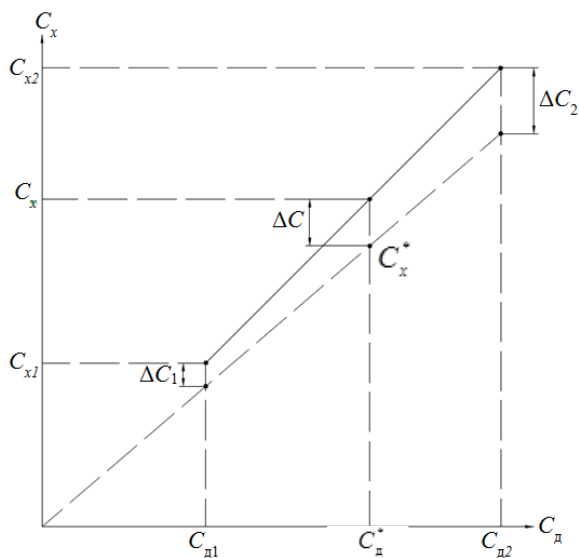


Рисунок 10 – Алгоритм корректировки измеренного значения емкости провода

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

$$C_x^* = C_x - \Delta C. \quad (6)$$

«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.

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 солёности 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 солёности 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.

ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах, индексируемых в Scopus:

1. 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.

2. Grigoriev M.G. Determination of Effect of Salt Content in Cooling Liquid on the Result of Cable Capacitance per Unit Length Measurement/ M.G. Grigoriev, G.V. Vavilova, N. S. Starikova// Applied Mechanics and Materials: Scientific

Journal. – 2015. – Vol. 756: Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS2014). – с. 546-551.

3. 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.

Публикации в журналах, рекомендуемых ВАК:

4. 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.

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

6. 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.

7. 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.

8. 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.

9. Григорьев М.Г. Уменьшение влияния содержания солей в воде охлаждающей ванны на результат измерения погонной емкости кабеля/ М.Г. Григорьев, Л.Н. Бабич, Г.В. Вавилова// Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1. – с. 8.

10. Миляев Д.В. Исследование первичного преобразователя измерителя емкости кабеля/ Д.В. Миляев, Г.В. Вавилова, Е.И. Шкляр// Ползуновский вестник. – 2012 – №. 2-1 – с. 168-170.

Публикации в рецензируемых изданиях:

11. Вавилова Г.В. Моделирование электроемкостного измерительного преобразователя для контроля погонной емкости электрического кабеля в процессе производства/ Г.В. Вавилова, А.В. Чапайкина // Вестник науки Сибири: электронный научный журнал/ Томский политехнический университет. – 2014. – № 4 (14). – с. 44-52.

12. Чапайкина А.В. Исследование влияния концентрации соли на результат измерения погонной емкости кабеля/ А.В. Чапайкина, Г.В. Вавилова //Вестник науки Сибири: электронный научный журнал/ Томский политехнический университет. – 2013. – № 4 (10). – с. 72-76.

Публикации в других научно-технических изданиях:

13. Мазиков С.В. Определение действительного значение погонной емкости образцов провода/ 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 «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее» в 3 т. – 2015 – Т. 1. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета – с. 131-135.

14. 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.

15. Вавилова Г.В. Электроемкостной преобразователь для контроля емкости кабеля/ Г.В. Вавилова, А.В. Чапайкина – Германия: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014 – 128 с.

16. Григорьев М.Г. Уменьшение влияния содержания солей в воде охлаждающей ванны на результат измерения погонной емкости кабеля/ М.Г. Григорьев, Л.Н. Бабич, Г.В. Вавилова// Современные проблемы науки и образования. – 2015 – №. 1. – С. 152.

17. Vavilova G.V. Electrocapacitive transducer to control in-process cable linear capacitance G.V. Vavilova// Лингвистика и межкультурная коммуникация: теоретические и методологические проблемы современного образования: сборник трудов II Российской научно-практической конференции с международным участием, г. Томск, 14–16 мая 2014 г./ Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – с. 83-86.

18. Гольдштейн А.Е. Подбор конструктивных параметров электроемкостного измерительного преобразователя для технологического контроля погонной емкости электрического кабеля/ А.Е. Гольдштейн, Г.В. Вавилова, А.В. Чапайкина// Информационно-измерительная техника и технологии: материалы V научно-практической конференции, Томск, 19-23 мая 2014 г./ под ред. А. В. Юрченко. – Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – с. 87-94.

19. Гольдштейн А.Е. Моделирование измерительного преобразователя для контроля погонной емкости электрического кабеля/ А.Е. Гольдштейн, Г.В. Вавилова// Измерение, контроль, информатизация: материалы XV Международной научно-технической конференции, Барнаул, 23 апреля 2014. – Барнаул: АлтГТУ, 2014 - С. 33-36.

20. Вавилова Г.В. Подбор оптимальных параметров электроемкостного измерительного преобразователя для технологического контроля погонной емкости/ Г.В. Вавилова, А.Е. Гольдштейн, В.Ю. Белянков// Наука, образование и производство - ведущие факторы Стратегии "Казахстан - 2050" (Сагиновские чтения № 6): труды Международной научно-практической конференции в 3-х частях. – Часть 3, Караганда, 26-27 июня 2014. – Караганда: КарГТУ, 2014 – с. 23-25.

21. Чапайкина А.В. Выявление влияния концентрации соли на результат измерения погонной емкости кабеля / А. В. Чапайкина, Г. В. Вавилова. // Информационно-измерительная техника и технологии: материалы IV Научно-практической конференции, Томск, 15-17 мая 2013 г./ под ред. А. В. Юрченко. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – с. 204-208.

22. Гольдштейн А.Е. Отстройка от влияния изменения электропроводности воды на результаты технологического контроля погонной емкости электрического кабеля/ А.Е. Гольдштейн, Г.В. Вавилова// Измерение, контроль, информатизация: материалы XIV Международной научно-технической конференции, Барнаул, 10 Апреля 2013. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2013 – Т. 1 – с. 117-120.