

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОЕМКОСТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЯ ПОГОННОЙ ЕМКОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КАБЕЛЯ

- ject Surfaces and Damage of High-Temperature Superconductive Tapes and Related Composites / I.P. Miroshnichenko, I.A. Parinov, E.V. Rozhkov, A.G. Serkin, V.P. Sizov // *Piezoelectrics and Related Materials: Investigations and Applications.*- New York: Nova Science Publishers, 2012.- pp. 238-282.
18. Мирошниченко, И.П. Коррекция результатов измерений малых перемещений лазерными интерферометрами [Текст] / И.П. Мирошниченко, А.Г. Серкин // Датчики и системы.- 2008.- № 3.- С. 28-30.
19. Мирошниченко, И.П. Комплексная коррекция в лазерной диагностике перемещений [Текст] / И.П. Мирошниченко, А.Г. Серкин // Фотоника.- 2009.- № 5(17).- С. 18-20.
20. Патент 2343403 РФ, МПК G 01 B 11/00. Способ регистрации перемещений оптическими датчиками / В.Е. Алехин, И.П. Мирошниченко, А.Г. Серкин, В.П. Сизов.- № 2007110769/28, заявл. 26.03.2007; опубл. 10.01.2009. Бюл. № 1.- 5 с.
21. Патент 2410642 РФ, МПК G01B11/00, G 01B 9/02. Интерференционный измеритель малых перемещений / И.П. Мирошниченко, В.А. Нестеров, А.Г. Серкин, В.П. Сизов, В.А. Шевцов.- № 2009121050/28, заявл. 02.06.2009; опубл. 27.01.2011. Бюл. № 3.- 9 с.
- Мирошниченко И.П., к.т.н. доц., заведующий кафедрой «Основы конструирования машин», E-mail: ipmir@rambler.ru; Шевцов В.А., преподаватель, Донской государственный технический университет*

УДК 621.3.08

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОЕМКОСТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЯ ПОГОННОЙ ЕМКОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КАБЕЛЯ

А.Е. Гольдштейн, Г.В. Вавилова

Описаны метод технологического контроля погонной емкости электрического кабеля в процессе производства и конструкция электроемкостного измерительного преобразователя. На основе результатов компьютерного моделирования взаимодействия электрического поля преобразователя с электрическим кабелем в среде COMSOL Multiphysics осуществлен выбор оптимальных конструктивных параметров основных элементов преобразователя.

Ключевые слова: емкость электрического кабеля, электроемкостный преобразователь, компьютерное моделирование, конструктивные параметры

Введение

Для ряда кабельных изделий, таких как кабели связи, кабели управления, радиочастотные кабели одной из основных характеристик является погонная электрическая емкость кабеля и связанное с ней волновое сопротивление. Значение погонной емкости нормируется стандартами на соответствующие виды кабелей [1].

Контроль емкости кабеля на соответствие требованиям к рабочей емкости осуществляется по ГОСТ 27893-88 [2]. Данный стандарт определяет порядок выходного контроля, который осуществляется с использованием отрезка готового кабеля. Такая методика проведения контроля имеет существенные недостатки, связанные с невозможностью контроля кабеля по всей его длине и получением информации о качестве кабеля уже после завершения его изготовления.

Эти недостатки устраняются в случае проведения контроля еще в процессе производства на стадии нанесения изоляции на

электропроводящую жилу. Для этого используется трубчатый электрод, погруженный в воду (обычно в охлаждающую ванну экструзионной линии). В процессе контроля измеряется емкость конденсатора, одной из обкладок которого является электропроводящая жила кабеля, а другой – вода, окружающая его изоляционную оболочку и находящаяся в электрическом контакте с трубчатым электродом, через который непрерывно движется контролируемый кабель. Данный метод контроля реализован в разработках ведущих фирм, специализирующихся в выпуске приборов контроля для кабельной промышленности: Sikora, Zumbach, Proton Products.

Постановка задачи исследований.

Цель данной работы заключалась в создании в среде COMSOL Multiphysics модели электроемкостного измерительного преобразователя и выборе с ее использованием оптимальных конструктивных параметров основных элементов преобразователя.

РАЗДЕЛ II. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

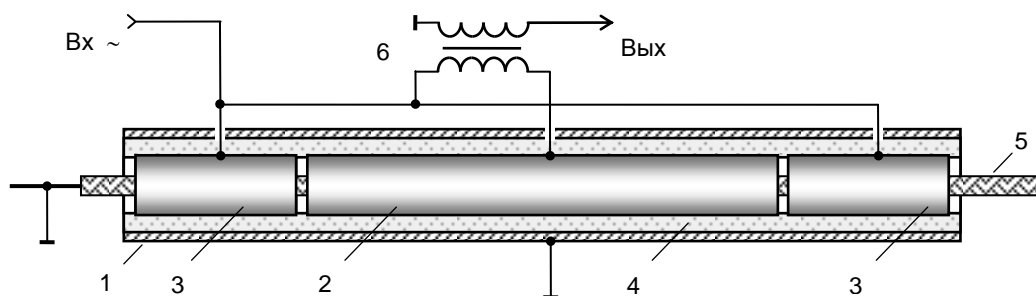


Рисунок 1 - Конструкция электроемкостного измерительного преобразователя:
1 – корпус преобразователя; 2 – измерительный электрод; 3 – дополнительные электроды;
4 – изолятор; 5 – кабель; 6 – трансформатор тока

На рисунке 1 показана конструкция используемого электроемкостного измерительного преобразователя (ЭИП). Составными элементами преобразователя являются цилиндрический металлический корпус 1, трубчатый измерительный электрод 2, два дополнительных трубчатых электрода 3. Измерительный и дополнительные электроды изолированы от корпуса изоляционным материалом 4. Контролируемый кабель 5 пропускается через трубчатые электроды преобразователя. Дополнительные электроды используются для обеспечения однородности электрического поля на краях измерительного электрода. Электропроводящая жила кабеля и корпус преобразователя соединены с общей точкой (землей). Трубчатые электроды соединены с генератором переменного напряжения \dot{U} , имеющего угловую частоту ω . Измерение силы тока в электрической цепи измерительного электрода осуществляется с использованием трансформатора тока 6. Преобразователь вместе с находящимся в нем участком контролируемого кабеля находится в воде, а точнее в водном электропроводящем растворе имеющих в технической воде солей, кислот и оснований [3].

Основными конструктивными параметрами ЭИП являются внутренний диаметр трубчатых электродов, длина измерительного и дополнительных электродов, расстояние (зазор) между измерительным и дополнительными электродами, внутренний диаметр цилиндрического корпуса преобразователя.

Оптимальной конструкцией ЭИП будем считать такую, при которой обеспечивается наиболее высокая однородность в продольном (осевом) направлении электрического поля между внутренней поверхностью трубчатого измерительного электрода и проводящей жилой контролируемого электрического

кабеля (рисунок 2). Только в этом случае обеспечивается минимальная зависимость функции преобразования погонной емкости электрического кабеля в выходной сигнал ЭИП от геометрических размеров кабеля, электрических свойств изоляции и изменения электропроводности воды.

В качестве критерия продольной одно-

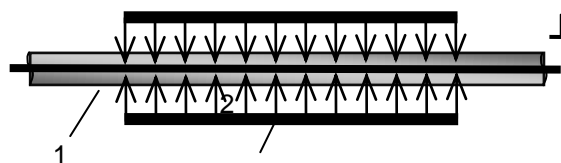


Рисунок 2 - Поле внутри преобразователя:
1 – кабель; 2 – измерительный электрод

родности поля внутри измерительного электрода в данном случае можно использовать отношение β значений погонной емкости C_0 между электродом и проводящей жилой кабеля на участке в центральной части электрода (где поле является заведомо однородным в продольном направлении) и погонной емкости C для всей длины измерительного электрода. Значение величины β при оптимальных значениях конструктивных параметров стремится к единице. Во всех рассматриваемых случаях в качестве участка с однородным полем рассматривалась центральная часть измерительного электрода, длина которой равна трети его общей длины.

Для обеспечения продольной однородности поля внутри измерительного электрода внутренний диаметр трубчатых электродов должен быть минимальным. Однако производственные условия требуют, чтобы контролируемый кабель свободно перемещался

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОЕМКОСТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЯ ПОГОННОЙ ЕМКОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КАБЕЛЯ

внутри ЭИИП, поэтому внутренний диаметр трубчатых электродов должен был как минимум в 2 раза больше наружного диаметра изоляции кабельного изделия.

Чем длиннее измерительный электрод, тем меньшее влияние будет оказывать неоднородность поля в продольном направлении на краях измерительных электродов. Но в этом случае возрастает продольный габаритный размер преобразователя, а кроме того при большой длине электрода не может быть обеспечена требуемая локальность контроля, для достижения которой наоборот рекомендуется использовать измерительный электрод минимальной длины [4]. Компромиссным размером является длина измерительного электрода порядка (200...300) мм.

Внутренний диаметр цилиндрического корпуса определяет значение начальной емкости ЭИИП (без объекта контроля). Поэтому из соображений его минимизации внутренний диаметр корпуса целесообразно выбирать, по крайней мере, в два раза превышающим наружный диаметр трубчатых электродов, а в качестве изолятора использовать воздушный зазор.

Остальные оптимальные конструктивные параметры ЭИИП могут быть определены путем компьютерного моделирования.

Компьютерное моделирование ЭИИП.

Для создания 3D модели преобразователя в среде моделирования COMSOL Multiphysics 3.5a использовался физический AC/DC модуль раздела Quasi-Statics Electric (3D) стандартной библиотеки.

Были заданы следующие фиксированные параметры модели: диаметр проводящей жилы кабеля – 2 мм; диаметр изоляционной оболочки кабеля – 6 мм; длина измерительного электрода – 200 мм; внутренний диаметр электродов – 20 мм; внутренний диаметр корпуса – 40 мм; толщина стенок электродов и корпуса – 1 мм; амплитуда потенциала электродов – 5 В, частота поля – 10 кГц.

При моделировании задавались два варианта электрических свойств воды: вода дистиллированная (удельная электропроводность $\sigma = 10^{-4}$ См/м) и вода соленая ($\sigma = 0,8$ См/м)

Построение геометрии создаваемой модели осуществлялось в разделе Draw, задание электрических свойств материалов – в разделе Physics (меню «Subdomain Settings»). Для задания граничных условий использовалось меню «Boundary Settings».

Последним этапом, предшествующим расчетам, является наложение сетки, от гу-

стоты которой напрямую зависит точность результата вычисления. Мелкая сетка во всем объеме дает более точный результат вычислений, но при этом увеличивается время. Поэтому использовалась достаточно крупная сетка по всему объекту, а далее в областях повышенной напряженности поля и ее градиента размер сетки уменьшался.

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

На рисунке 3 эквипотенциальными линиями показано полученное в среде Comsol Multiphysics распределение электрических потенциалов при взаимодействии электрического поля преобразователя с электрическим кабелем для случая отсутствия дополнительных электродов и использования дистиллированной воды. На рисунке 4 показано распределение значений продольной E_x (направлена вдоль оси кабеля) и радиальной E_r пространственных составляющих вектора

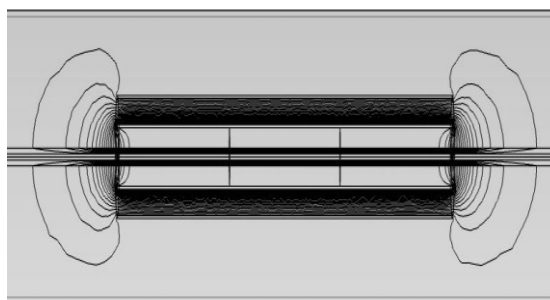


Рисунок 3 - Картина поля для ЭИИП без дополнительных электродов (вода дистиллированная)

напряженности электрического поля преобразователя. Здесь и далее напряженность электрического поля определялась в средней части оболочки кабеля при значении радиуса вдвое превышающем радиус проводящей жилы.

Анализ результатов моделирования, представленных на рисунках, показывает, что при отсутствии дополнительных электродов имеет место «выпучивание» электрического поля у краев электрода и, как следствие, высокая неоднородность поля в этих областях. При заданных условиях значение величины β , характеризующей степень однородности электрического поля в продольном (осевом) направлении, составляет приблизительно 0,80, что обуславливает наличие методической погрешности измерения погонной емкости порядка 20 %.

РАЗДЕЛ II. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

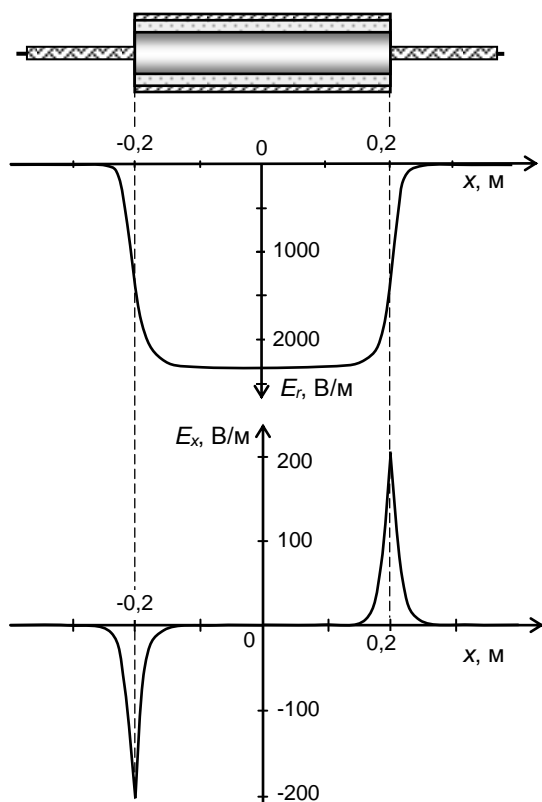


Рисунок 4 - Распределение радиальной E_r и продольной E_x составляющих напряженности электрического поля вдоль продольной оси для ЭИИП без дополнительных электродов

Использование соленой воды несколько повышает степень однородности поля у краев электрода. В этом случае значение $\beta = 0,87$. Качественно картина поля аналогична представленной на рисунке 3 для случая дистиллированной воды.

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

На рисунке 5 показано распределение электрических потенциалов при взаимодействии электрического поля преобразователя с электрическим кабелем для случая наличия дополнительных электродов и использования дистиллированной воды. Длина дополнительных электродов задавалась равной 100 мм (5 внутренних диаметров электродов). Расстояние между измерительным и дополнительными электродами задавалось минимально возможным с точки зрения технической реализации и равным 2 мм. На рисунке 6 показано распределение значений про-

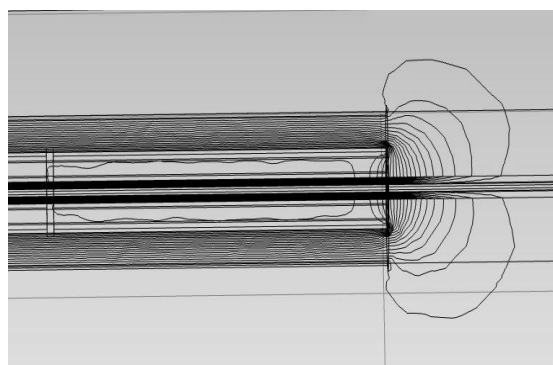


Рисунок 5 - Картина поля на краю измерительного преобразователя для ЭИИП с дополнительными электродами длиной 100 мм и зазоре 2 мм (вода дистиллированная)

дольной E_x и радиальной E_r пространственных составляющих вектора напряженности электрического поля преобразователя.

Анализ результатов моделирования,

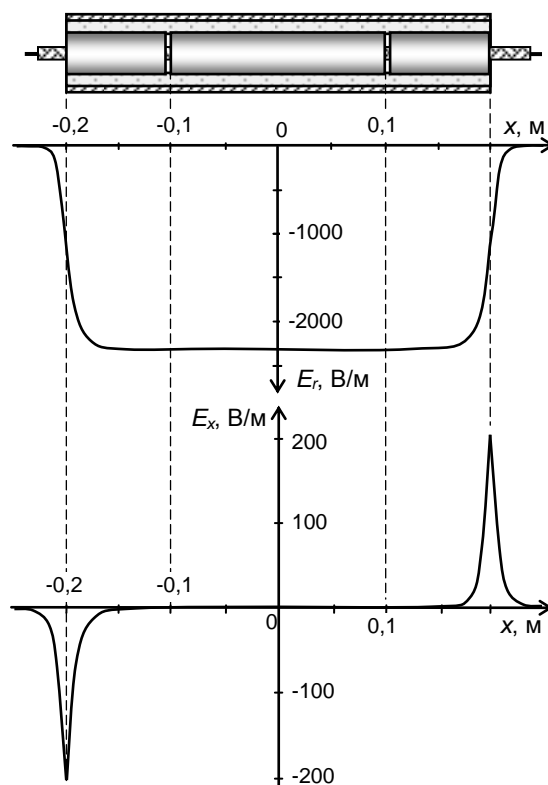


Рисунок 6 - Распределение радиальной E_r и продольной E_x составляющих напряженности электрического поля вдоль продольной оси для ЭИИП с дополнительными электродами и при малом зазоре между электродами

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОЕМКОСТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЯ ПОГОННОЙ ЕМКОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КАБЕЛЯ

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 составляет в этом случае 0,99, что соответствует практически оптимальному варианту конструкции. Использование соленой воды дает еще большее приближение значения величины β к единице.

Здесь следует отметить, что при моделировании влияния дополнительных электродов задавалось заведомо большое значение их длины. В практическом же плане приемлемая степень однородности обеспечивается при уменьшении длины электродов до значения равного двум внутренним диаметрам электродов.

Также было исследовано влияние зазора между измерительным и дополнительным электродами.

Как было показано выше расстояние между электродами 2 мм (десятая часть внутреннего диаметра электродов) практически не ухудшает однородности электрического поля в продольном направлении. Однако увеличение этого расстояния до большего значения отрицательно сказывается на однородности поля.

На рисунке 7 показано распределение электрических потенциалов при взаимодей-

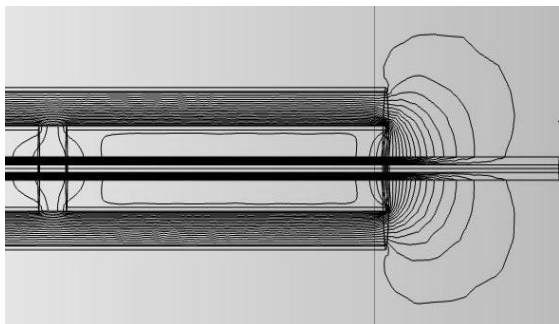


Рисунок 7- Картина поля на краю измерительного преобразователя для ЭИП с дополнительными электродами длиной 100 м и зазоре 8 мм (вода дистиллированная)

ствии электрического поля преобразователя с электрическим кабелем для случая наличия дополнительных электродов и использования дистиллированной воды. Расстояние между измерительным и дополнительным электродами задавалось равным 8 мм. На рисунке 8 показано распределение значений продоль-

ной E_x и радиальной E_r пространственных составляющих вектора напряженности электрического поля преобразователя.

Анализ результатов моделирования, показывает, что при данном значении зазора в области зазора наблюдается существенная неоднородность электрического поля в продольном направлении. Соответственно значение величины β уменьшается в этом случае до 0,96, что эквивалентно наличию методической погрешности измерения погонной емкости порядка 4 %.

Использование соленой воды устраняет продольную неоднородность поля в области зазоров. Значение величины β в этом случае

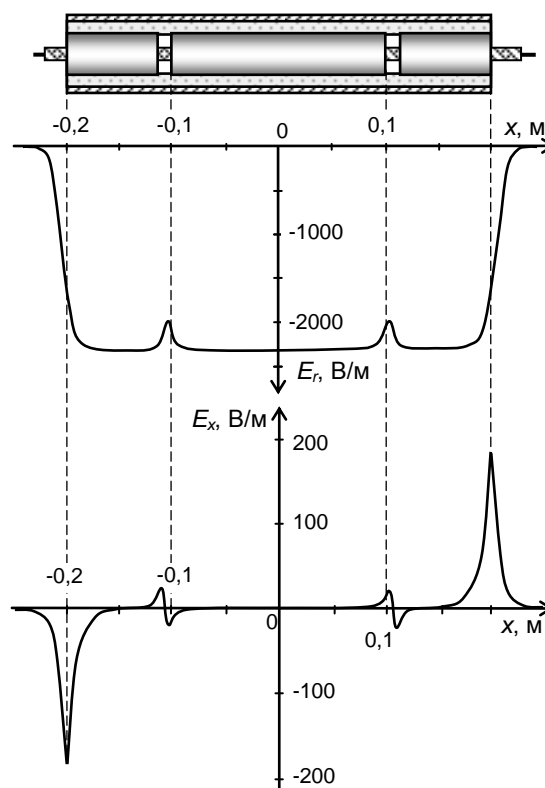


Рисунок 8 - Распределение радиальной E_r и продольной E_x составляющих напряженности электрического поля вдоль продольной оси для ЭИП с дополнительными электродами и при большом зазоре между электродами

становится близким к оптимальному значению равному единице. В реальных условиях контроля солёность воды может изменяться в широких пределах, поэтому для обеспечения независимости результатов контроля погонной емкости от изменения солёности следует ориентироваться на результаты, полученные ранее для наиболее неблагоприятного случая использования дистиллированной воды и

РАЗДЕЛ II. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

выбирать по возможности меньшее значение зазора.

Заключение

На основе результатов компьютерного моделирования в среде COMSOL Multiphysics взаимодействия электрического поля электроемкостного измерительного преобразователя измерителя погонной емкости с электрическим кабелем осуществлен выбор оптимальных конструктивных параметров основных элементов преобразователя: внутреннего диаметра трубчатых электродов, длины измерительного и дополнительных электродов, расстояния между измерительным и дополнительными электродами, внутреннего диаметра цилиндрического корпуса преобразователя. Оптимальность конструкции оценивалась степенью приближения к единице отношения значений погонной емкости между электродом и проводящей жилой кабеля на участке электрода с однородным в продольном направлении полем и для всей длины измерительного электрода. Оценено влияние на характеристики измерительного

преобразователя электропроводности используемой воды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 11326.0-78. Радиочастотные кабели. Общие технические условия. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2003. – 35 с.
2. ГОСТ 27893–88 (СТ СЭВ 1101–87). Кабели связи. Методы испытаний. Москва: Изд-во стандартов, 1989. 26 с.
3. Гольдштейн, А. Е. Отстройка от влияния изменения электропроводности воды на результаты технологического контроля погонной емкости электрического кабеля [Текст] / А.Е. Гольдштейн, Г.В. Вавилова // Ползуновский вестник. – 2013. - № 2. - С. 146-150.
4. Пат. № 2358928 GB, МПК G01B 7/06 A system for monitoring fluctuations in the thickness of a cable insulating sheath / Patrick Fleming, Lee Robert Coleman.; заявл. 04.02.2000; опубл. 08.08.2001.

Д.т.н., зав. кафедрой А.Е. Гольдштейн, algol@tpu.ru; аспирант Г.В. Вавилова, wgw@tpu.ru - Национальный исследовательский Томский политехнический университет, кафедра информационно-измерительной техники, тел. (3822) 418911

УДК 621.3.089.68

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО КОНТРОЛЯ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Н.С. Старикова, В.В. Редько

В работе представлен метод контроля состояния изоляции по изменению электрической емкости при электроискровом контроле кабельных изделий, предложены рекомендации по выбору параметров электрода и испытательного напряжения для повышения информативности контроля.

Ключевые слова: электроискровой контроль, кабель, электрод, электрическая емкость, пробой

Введение

В настоящее время кабельная промышленность является одной из наиболее развивающихся отраслей. На всех этапах производства кабельных изделий необходимо обеспечивать контроль различных параметров: внешней геометрии, состава изоляционного материала, эксцентricности и т.д.

Непрерывный контроль состояния изоляции кабельных изделий в процессе производства позволяет уменьшать объем отбракованной продукции, тем самым увеличивая эффективность производства. Испытания электрической прочности осуществляются двумя методами – электроискровым и электроемкостным. Классический элек-

троискровой дефектоскоп позволяет обнаруживать только сквозные дефекты. Измеритель емкости позволяет регистрировать и другие виды дефектов (локальное увеличение / уменьшение диаметра, воздушные полости), но, учитывая необходимость дополнительного технического обслуживания и дополнительного оборудования для обеспечения работы системы, может быть установлен не на каждой производственной линии. Таким образом, для увеличения эффективности контроля было предложено конструктивно объединить оба метода путем включения в электроискровой дефектоскоп дополнительного блока контроля погонной электрической емкости [1].

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2, 2014