

РАЗДЕЛ II. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 535.854

ОПТИЧЕСКОЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ МАЛЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОБЪЕКТОВ КОНТРОЛЯ С ЗАЩИТОЙ ОТ ВНЕШНИХ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

И.П. Мирошниченко, В.А. Шевцов

Описаны высокоточные бесконтактные средства измерений малых линейных и угловых перемещений поверхностей объектов контроля, основанные на современных лазерных технологиях и новых методах оптической интерферометрии. Предложено новое научно-обоснованное техническое решение, позволяющее обеспечить их непрерывную защиту от влияния внешних механических воздействий в процессе проведения измерений

Ключевые слова: лазерный интерферометр, интерференционная картина, измерение малых перемещений, поверхность объекта контроля, диагностика состояния

Введение

Разработка и внедрение новых высокоточных измерительных средств и технологий для контроля качества конструкционных материалов и диагностики состояния изделий, находящихся в условиях эксплуатации, в настоящее время актуальны и востребованы при решении многих научных и прикладных задач. Перспективным в этом случае является применение бесконтактных средств измерений малых перемещений поверхностей объектов контроля, основанных на современных лазерных технологиях и новых методах оптической интерферометрии, что позволяет существенно повысить точность и информативность результатов исследования акустическими методами неразрушающего контроля.

Описание разработки

В работе [1] предложено оптическое интерференционное устройство для измерения малых линейных перемещений, разработанное на основе двухходового лазерного интерферометра с совмещенными ветвями, описанного в [2,3], схема которого представлена на Рисунке 1.

Устройство [1] содержит оптически связанные и последовательно размещенные источник когерентного оптического излучения 1 (газовый или полупроводниковый лазер), оптическую систему 2, светоделитель 3, отражатель 4, закрепленный на поверхности 5 объекта контроля 6, и экран 7, с установленным на нем фотоприемным устройством (ФПУ) 8. При этом

светоделитель 3 и отражатель 4 расположены друг относительно друга под углом α , а полученная при совмещении опорного и объектного пучков интерференционная картина 9, представляющая собой совокупность колец 10 различной интенсивности, проецируется на экран 7. ФПУ 8 выполнено в виде прямоугольной матрицы фотоприемников 11 и установлено в плоскости экрана 7 радиально кольцам 10 интерференционной картины 9 на интервале от края 12 интерференционной картины 9, противоположного вершине угла α между светоделителем 3 и отражателем 4, до центра интерференционной картины 9. ФПУ 8 соединено с устройством для регистрации, обработки и отображения результатов измерений.

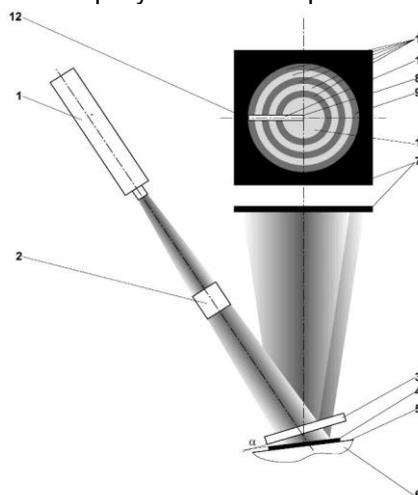


Рисунок 1 – Схема устройства для измерения малых перемещений

ОПТИЧЕСКОЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ МАЛЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОБЪЕКТОВ КОНТРОЛЯ С ЗАЩИТОЙ ОТ ВНЕШНИХ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Принцип действия устройства [1] заключается в следующем. Излучение источника 1 после прохождения оптической системы 2 преобразуется в расходящийся пучок и попадает на светоделитель 3, где происходит его разделение: одна часть отражается от поверхности светоделителя 3 (опорный пучок), а вторая часть - от отражателя 4 (объектный пучок), закрепленного на поверхности 5 объекта контроля 6. Полученная при совмещении опорного и объектного пучков интерференционная картина 9, проецируется на экран 7 с установленным на нем ФПУ 8.

Возможным может быть случай, когда отражатель 4 отсутствует, а его функции непосредственно выполняет сама отражающая поверхность 5 объекта контроля 6.

Изменение интенсивности колец интерференционной картины от минимального до максимального значения происходит при перемещении поверхности объекта контроля на величину $\lambda/4$, где λ – длина волны оптического излучения (например, для оптического излучения гелий-неонового газового лазера, красного цвета, $\lambda = 0,63$ мкм).

ФПУ 8 при линейном перемещении поверхности 5 объекта контроля 6 производит измерение интенсивности оптического поля в области интерференционной картины, обладающей максимальными информационными и др. характеристиками (высокими контрастностью, динамическим диапазоном и т.д.). Результаты измерений интенсивности оптического поля интерференционной картины, однозначно связанные с линейным перемещением поверхности 5 объекта контроля 6, от ФПУ 8 передаются далее для регистрации, обработки и отображения результатов измерений.

Возможными вариантами регистрации интенсивности в этом случае могут быть регистрация суммарной интенсивности оптического поля по поверхности ФПУ 8, регистрация интенсивности оптического поля в кольце одного порядка, в кольцах первого и второго порядка и т.д., т.е. устройство [1] обеспечивает реализацию практически всех известных вариантов регистрации информации с интерференционных картин.

Устройства [1] научно обосновано, его технические и функциональные характеристики достаточно полно определены и изучены при проведении расчетно-теоретических и экспериментальных исследований, проведенных с использованием опытных образцов, результаты которых приведены в [4-9].

Для расширения функциональных возможностей устройств [1-3] за счет одновременного измерения малых линейных и угловых перемещений поверхностей объектов контроля, что наиболее важно при решении практических задач, где только линейные перемещения встречаются довольно редко, предложены новые научно-обоснованные метод [10-12], способ и устройство [13], результаты расчетно-экспериментальных исследований которых опубликованы в работах [10-12,14-17].

Контроль функционирования устройств [1-3,13] в процессе проведения измерений и устранение влияния на их результаты «внутренних» дестабилизирующих факторов (колебания напряжения в силовой сети, изменения интенсивности излучения источника, микродефекты элементов оптических схем и т.п.), снижающих качество результатов измерений, могут быть обеспечены при использовании новых метода [18-19] и способа [20] комплексной коррекции результатов измерений малых перемещений оптическими интерференционными средствами, заключающихся в том, что в процессе измерений одновременно и непрерывно производится регистрация суммарной интенсивности оптического поля по площади интерференционной картины, по величине которой определяют поправку, вносимую «в едином масштабе времени» в результаты измерений.

Однако, в настоящее время существенным недостатком, сдерживающим применение известных высокоточных оптических устройств для измерения перемещений, основанных на использовании интерференционных методов, в том числе и устройств [1-3, 13], является низкое качество результатов измерений, обусловленное воздействием на них в процессе измерений внешних нестационарных и, как правило, случайных механических воздействий (вибраций технологического испытательного оборудования, механических воздействий различной природы и т.п.), которые вызывают дополнительные перемещения и вносят случайные погрешности в результаты измерений. Проявления отмеченного недостатка особенно наглядны при использовании оптических интерференционных средств измерений в составе мобильных диагностических комплексов, т.е. при проведении измерений в «полевых» условиях.

Разработано новое техническое решение, позволяющее обеспечить непрерывную защиту известных устройств [1-3,13] от влияния внешних механических воздействий в процессе проведения измерений за счет регистрации и одновременной компенсации малых перемещений поверхностей объектов

РАЗДЕЛ II. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

контроля, вызванных внешними механическими воздействиями и влияющими на результаты измерений, которое защищено патентом Российской Федерации на изобретение [21].

Схема предлагаемого устройства представлена на Рисунке 2, а на Рисунке 3 приведено увеличенное изображение экрана с размещенными в его плоскости ФПУ.

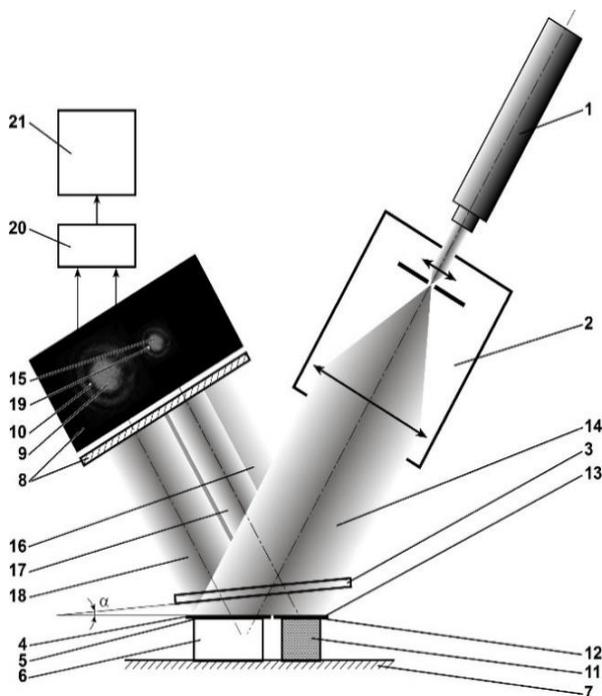


Рисунок 2 – Схема устройства

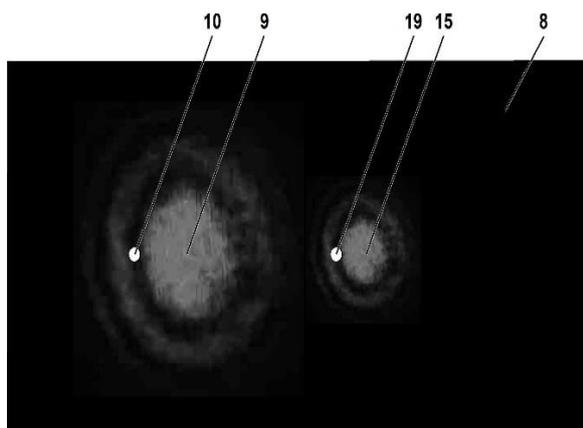


Рисунок 3 – Внешний вид экрана с ФПУ

Устройство [21] содержит оптически связанные и последовательно размещенные источник 1 когерентного оптического излучения, оптическую систему 2, светоделитель 3, отражатель 4, закрепленный на поверхности 5 объекта контроля 6, жестко скрепленного с

опорным основанием 7, и расположенный под углом α к светоделителю 3, экран 8 с установленным в его плоскости в заданной области интерференционной картины 9 ФПУ 10.

В состав устройства также входят имитатор 11 объекта контроля с установленным на его поверхности 12 дополнительным отражателем 13, причем имитатор 11 жестко закреплен на опорном основании 7 в области, облучаемой пучком 14 оптического излучения за оптической системой 2, и снабжен устройствами для регулировки положения дополнительного отражателя 13. Дополнительный отражатель 13 размещен в одной плоскости с отражателем 4, закрепленным на поверхности 5 объекта контроля 6. На экран 8 дополнительно проецируется интерференционная картина 15, полученная при совмещении опорного пучка 16 от светоделителя 3 и объектного пучка 17 от дополнительного отражателя 13. В плоскости экрана 8 в ее области, аналогичной области интерференционной картины 9, полученной при совмещении опорного пучка 16 от светоделителя 3 и объектного пучка 18 от отражателя 4, закрепленного на поверхности 5 объекта контроля 6, установлено дополнительное ФПУ 19, т.е. ФПУ 10 и дополнительное ФПУ 19 установлены соответственно в кольцах первого порядка интерференционных картин 9 и 15 (см. Рисунок 3). Выходы ФПУ 10 и 19 соединены со входами дифференциального усилителя 20, выход которого был связан с устройством 21 регистрации, обработки и отображения результатов измерений.

Принцип действия устройства заключается в следующем. Перед началом проведения испытаний на основании 7 жестко закрепляется объект контроля 6 с установленным на его поверхности 5 отражателем 4 и имитатор 11 объекта контроля с установленным на его поверхности 12 дополнительным отражателем 13. После этого осуществляется сборка оптической измерительной схемы путем последовательного расположения и обеспечения оптической связи источника 1, оптической системы 2, светоделителя 3, при этом отражатель 4 и дополнительный отражатель 13 располагается под углом α к светоделителю 3, при этом объект контроля 6 с отражателем 4 и имитатор 11 с дополнительным отражателем 13 располагается на опорном основании 7 в области, облучаемой пучком 14 оптического излучения за оптической системой 2. Далее, производится регулировка положения дополнительного отражателя 13 при помощи имитатора 11 объекта контроля, выполненного с

ОПТИЧЕСКОЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ МАЛЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОБЪЕКТОВ КОНТРОЛЯ С ЗАЩИТОЙ ОТ ВНЕШНИХ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

возможностью проведения данной операции, путем его размещения в одной плоскости с отражателем 4 таким образом, что на экране 8 проецируются интерференционные картины 9 и 15, полученные соответственно при совмещении опорного пучка 16 от светоделителя 3 и объектного пучка 18 от отражателя 4 и опорного пучка 16 от светоделителя 3 и объектного пучка 17 от дополнительного отражателя 13. В плоскости экрана 8 в аналогичных заданных областях интерференционных картин 9 и 15 устанавливается соответственно ФПУ 10 и дополнительное ФПУ 19, выходы которых электрически соединяются с дифференциальным усилителем 20. Выход дифференциального усилителя 20 соединяется с устройством 21 регистрации, обработки и отображения результатов измерений.

В процессе проведения испытаний ФПУ 10 и 19 регистрируют интенсивности оптического поля по местам их установки в заданных областях интерференционных картин 9 и 15. Сигналы ФПУ 10 и 19 передаются на входы дифференциального усилителя 20, где сигнал дополнительного ФПУ 19, содержащий информацию о перемещениях отражателя 13, вызванных случайными возмущениями, вычитается из сигнала ФПУ 10, содержащего информацию о перемещениях отражателя 4, вызванных суммарными перемещениями поверхности 5 объекта контроля 6 («полезный сигнал») в процессе контроля и случайными возмущениями. После чего, сигнал с выхода дифференциального усилителя 20, содержащий только информацию о перемещениях поверхности 5 объекта контроля 6 в процессе контроля, передается на вход устройства 21 регистрации, обработки и отображения результатов измерений, в котором производится установление соответствия измеренной интенсивности, однозначно связанной с ней перемещением поверхности 5 объекта контроля 6, его регистрация и отображение полученного результата измерений.

Для подтверждения принципиальной возможности реализуемости предлагаемого устройства и проведения экспериментального исследования его технических и функциональных характеристик была разработана экспериментальная установка, схема которой была аналогична приведенной на Рисунке 2.

В процессе испытаний моделировались следующие варианты:

- при фиксированном (постоянном) перемещении поверхности 5 объекта контроля 6 создавалось гармоническое воздействие, приложенное к опорному основанию 7, имитирующее внешнее механическое воздействие;

- при импульсном перемещении поверхности 5 объекта контроля 6 создавалось гармоническое воздействие, приложенное к опорному основанию 7, имитирующее внешнее механическое воздействие.

В процессе проведения испытаний регистрировались сигналы на выходах ФПУ 10, дополнительного ФПУ 19 и дифференциального усилителя 20, при этом ФПУ 10 и 19 были установлены в плоскости экрана в кольцах первого порядка интерференционных картин 9 и 15 соответственно.

Результаты испытаний представлены в виде осциллограмм на Рисунке 4 соответственно для первого (а) и второго (б) из отмеченных вариантов моделирования, где на Рисунке 4: кривые 1 – сигнал на выходе ФПУ 10; кривые 2 – сигнал на выходе ФПУ 19; кривые 3 – сигнал на выходе усилителя 20.

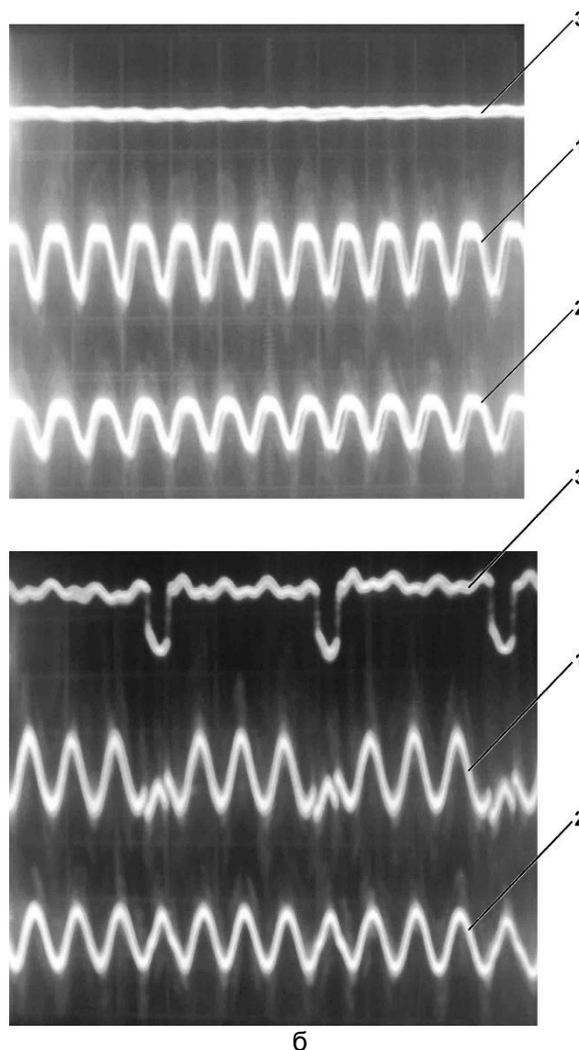


Рисунок 4 – Результаты испытаний

РАЗДЕЛ II. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о реализуемости предлагаемого способа и решении поставленной задачи разработки, а именно, повышении качества результатов измерений малых перемещений поверхностей объектов контроля.

Выводы

В статье описаны высокоточные бесконтактные средства измерений малых линейных и угловых перемещений поверхностей объектов контроля, основанные на современных лазерных технологиях и новых методах оптической интерферометрии, а также предложено новое научно-обоснованное техническое решение, позволяющее обеспечить их непрерывную защиту от влияния внешних механических воздействий в процессе проведения измерений.

Предлагаемые технические решения успешно применяются для решения актуальных научных и производственных задач и могут быть также успешно использованы для контроля качества конструкционных материалов и диагностики состояния изделий, находящихся в условиях эксплуатации в машиностроении, судостроении, авиастроении и т.п.

Настоящие разработки частично поддержаны грантом РФФИ № 13-08-00754.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент 2373492 РФ, МПК G 01 B 11/00, G 01 B 21/00. Оптическое устройство для измерения перемещений / И.П. Мирошниченко, И.А. Парин, Е.В. Рожков, А.Г. Серкин.- № 2007144257/28, заявл. 28.11.2007; опублик. 20.11.2009. Бюл. № 32.- 7 с.
2. Матвеев, А.Н. Оптика [Текст] / А.Н. Матвеев.- М.: Высшая школа, 1985.- 351 с.
3. Батраков, А.С. Лазерные измерительные системы / А.С. Батраков, М.М. Бутусов, Г.П. Гречка.- М.: Радио и связь, 1981.- 456 с.
4. Мирошниченко, И.П. Результаты экспериментальных исследований интерференционного измерителя малых перемещений [Текст] / И.П. Мирошниченко, А.Г. Серкин // Измерительная техника.- 2006.- № 5.- С. 22-25.
5. Мирошниченко, И.П. Особенности использования интерференционных измерителей малых перемещений при решении задач диагностики технического состояния конструкций [Текст] / И.П. Мирошниченко, А.Г. Серкин // Дефектоскопия.- 2007.- № 4.- С. 31-38.
6. Мирошниченко, И.П. Экспериментальное обоснование предложений по совершенствованию интерференционных измерителей малых перемещений [Текст] / И.П. Мирошниченко, А.Г. Серкин // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения.- 2009.- № 1(8).- С. 85-90.
7. Мирошниченко, И.П. Электродинамический анализ лазерных интерферометров [Текст] / И.П. Мирошниченко, А.Г. Серкин, В.П. Сизов // Общие вопросы радиоэлектроники. Научно-технический сборник.- Ростов-на-Дону: РНИИРС.- 2009.- С. 155-161.
8. Мирошниченко, И.П. Перспективные оптические средства измерения малых перемещений для систем диагностики технического состояния материалов и изделий [Текст] / И.П. Мирошниченко // Контроль. Диагностика.- 2010.- № 1.- С. 45-49.
9. Мирошниченко, И.П. Лазерный интерферометр для измерения перемещений [Текст] / В.Е. Алейкин, И.П. Мирошниченко, А.Г. Серкин // Нанодурия.- 2010.- № 2.- С. 38-41.
10. Мирошниченко, И.П. Численное исследование метода измерений малых линейных и угловых перемещений лазерными интерферометрами [Текст] / И.П. Мирошниченко, А.Г. Серкин, В.П. Сизов // Измерительная техника.- 2007.- № 1.- С. 9-13.
11. Мирошниченко, И.П. Унифицированный метод измерения малых пространственных перемещений лазерными интерферометрами [Текст] / И.П. Мирошниченко, А.Г. Серкин, В.П. Сизов // Известия вузов. Приборостроение.- 2007.- № 12.- С. 34-40.
12. Мирошниченко, И.П. Унифицированный метод измерения малых линейных и угловых перемещений поверхностей объектов контроля [Текст] / И.П. Мирошниченко, А.Г. Серкин // Дефектоскопия.- 2008.- № 5.- С. 23-27.
13. Патент 2388994 РФ, МПК G 01 B 11/00, G 01 B 9/02. Способ измерения линейных и угловых перемещений [Текст] / И.П. Мирошниченко, А.Г. Серкин, В.П. Сизов. - № 2008141364/28, заявл. 20.10.2008; опублик. 10.05.2010. Бюл. № 13.- 7 с.
14. Мирошниченко, И.П. Использование точечного источника излучения для расширения функциональных возможностей измерителя перемещений [Текст] / И.П. Мирошниченко, А.Г. Серкин, В.П. Сизов // Оптический журнал.- 2008.- Том 75.- № 7.- С. 41-47.
15. Мирошниченко, И.П. О применении дифракционных решеток в перспективных лазерных интерферометрах [Текст] / И.П. Мирошниченко, А.Г. Серкин, В.Н. Прокопец // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения.- 2009.- № 1(8).- С. 107-113.
16. Мирошниченко, И.П. Об использовании оптических интерференционных методов для измерения линейных и угловых перемещений в системах диагностики технического состояния материалов и изделий [Текст] / И.П. Мирошниченко, А.Г. Серкин // Контроль. Диагностика.- 2011.- № 7.- С. 46-50.
17. Miroshnichenko, I.P. Novel Test Means and Techniques Based on Optical Interferometry and Acoustic Emission to Study Displacements of Ob-

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.