УДК 620.1.08

ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ГРАДУИРОВКИ И ПОВЕРКИ ДВУХПАРАМЕТРОВЫХ ВИХРЕТОКОВЫХ ТОЛЩИНОМЕРОВ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

© 2024 г. М.В. Сясько[1,*], И.П. Соловьев[1,], П.В. Соломенчук[2,***]**

[1]Санкт-Петербургский Государственный Университет, Россия 199034 Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9
[2]ООО «КОНСТАНТА», Россия 198095 Санкт-Петербург, Огородный пер., 21
E-mail:[*]m.syasko@gmail.com; [**]i.soloviev@spbu.ru; [***]pavel257@mail.ru

Поступила в редакцию 23.04.2024; после доработки 16.05.2024
Принята к публикации 17.05.2024

Приведено описание принципов работы и исследования точности установки-имитатора толщины диэлектрического покрытия, предназначенной для проведения автоматической градуировки толщиномера покрытий с использованием большого числа градуировочных точек. Описана процедура градуировки толщиномера покрытий, учитывающая особенности конструкции и способы компенсации основных источников погрешности установки-имитатора толщины диэлектрического покрытия.

Ключевые слова: вихретоковый, толщиномер, градуировка, точность.

TECHNIQUE FOR AUTOMATIC GRADUATION AND VERIFICATION OF TWO-PARAMETER EDDY-CURRENT THICKNESS GAUGES OF DIELECTRIC COATINGS

© 2024 M.V. Syasko[1,*], I.P. Soloviev[1,], P.V. Solomenchuk[2,***]**

[1]St. Petersburg State University, Russia 199034 St. Petersburg, University embankment, 7/9
[2]JSC «CONSTANTA», Russia 198095 St. Petersburg, Ogorodniy pereulok, 21
E-mail:[*]m.syasko@gmail.com; [**]i.soloviev@spbu.ru; [***]pavel257@mail.ru

The article describes the non-conductive coating thickness simulating system, designed for automatic graduation of the coating thickness gauge using a large number of graduation points. The accuracy of the non-conductive coating thickness simulating system has been evaluated. The procedure for graduation of the coating thickness gauge is described, taking into account the design features and ways to compensate for the main sources of errors of the non-conductive coating thickness simulating system.

Keywords: eddy-current, thickness gauge, graduation, accuracy.

DOI:

Для измерения толщины диэлектрических покрытий ($T_п$), например, лакокрасочных или анодноокисных, на немагнитных металлических основаниях применяются вихретоковые толщиномеры покрытий, реализующие амплитудный метод [1], которые во многом не удовлетворяют современным требованиям к погрешности измерений. В частности, имеется зависимость показаний от величины удельной электрической проводимости σ основания объекта контроля. Для компенсации этой зависимости представляет интерес использование амплитудно-фазового вихретокового преобразователя (ВТП) и методики обработки (анализа) действительной и мнимой составляющих сигнала $\mathring{U}(T\text{п}, \sigma)$ ВТП на комплексной плоскости с применением алгоритма двухмерной градуировки [2]. Градуировочная характеристика толщиномера, реализующего двухпараметровый метод измерения, представляет собой веерообразную сетку $\mathring{U}(T\text{п}, \sigma)$ на комплексной плоскости (рис. 1).

При проведении измерений Tп, в соответствии с алгоритмом обработки измерительной информации, описанном в [2], обеспечивается учет и подавление влияния σ. Однако для реализации алгоритма необходима градуировочная таблица с большим набором градуировочных точек (порядка нескольких тысяч), которые необходимо снимать на наборе образцовых оснований (ОО), перекрывающих диапазон актуальных значений σ в диапазоне от 1 до 60 МСм/м, что делает ручную процедуру градуировки с использованием мер толщины покрытия практически не выполнимой. Для устранения этих проблем предлагается использовать установку-имитатор толщины диэлектрического покрытия (УИТП), внешний вид и состав которой приведен на рис. 2.

На рис. 3 изображена структурная схема УИТП. При проведении градуировки ОО укладывается в ложемент. Производится перемещение ОО вниз до момента его касания с контактной по-

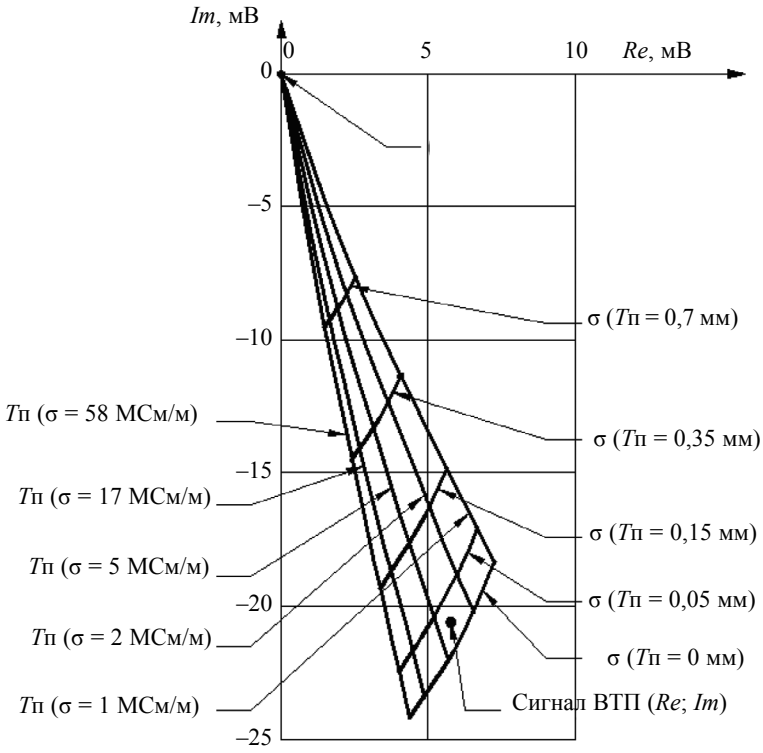


Рис. 1. Пример расчета годографов сигнала $\mathring{U}(T\text{п}, \sigma)$ для конечно-элементной модели трехобмоточного трансформаторного скомпенсированного амплитудно-фазового ВТП [2].

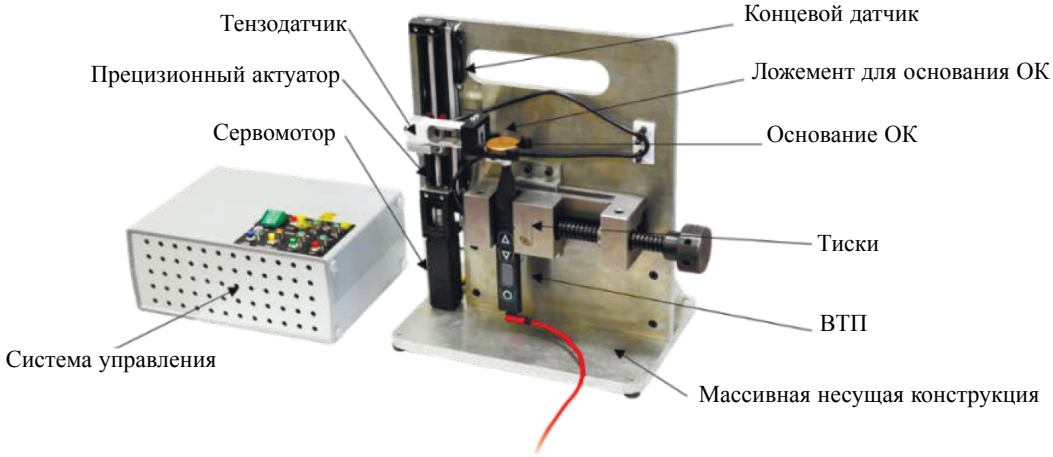


Рис. 2. Внешний вид установки-имитатора толщины диэлектрического покрытия.

верхностью ВТП. Определение момента касания производится с использованием сигнала, сформированного тензодатчиком, соответствующего $T\text{п} = 0$. После этого производится ступенчатое перемещение ОО вверх по управляющей программе, имитирующей задание Tп. Считывание сигнала ВТП (*Im*, *Re*) и запись в градуировочную таблицу производится во время остановки по сигналу достижения заданной позиции ($T\text{п}i$), сформированному серводрайвером. При достижении ОО положения, соответствующего пределу измерения $T\text{п}\max$, производится замена ОО вручную на следующее, имеющее другое значение σ, после чего цикл повторяется для каждого ОО.

Сигнал тензодатчика подается на усилитель, содержащий абсолютный и дифференциальный каналы с логическими выходами. В процессе градуировки микроконтроллер толщиномера производит не только обработку сигналов с выхода измерительного преобразователя, но и тактирует работу всех элементов УИТП.

В рамках испытаний были определены основные источники погрешности задания (выставления) толщины покрытия, определяемые конструкцией УИТП:

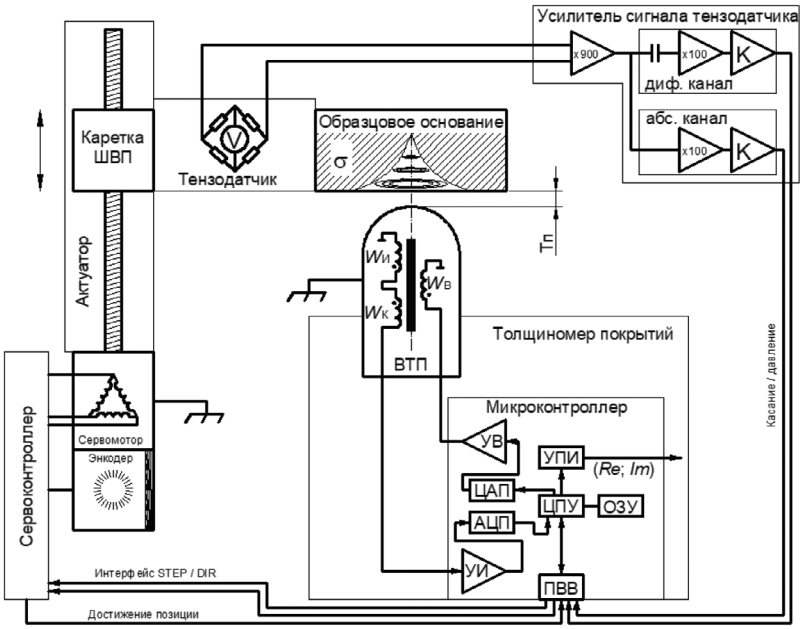


Рис. 3. Структурная схема установки-имитатора толщины покрытия и измерительного преобразователя толщиномера. *W*и, *W*к и *W*в — измерительная, компенсационная и возбуждающая обмотки ВТП.

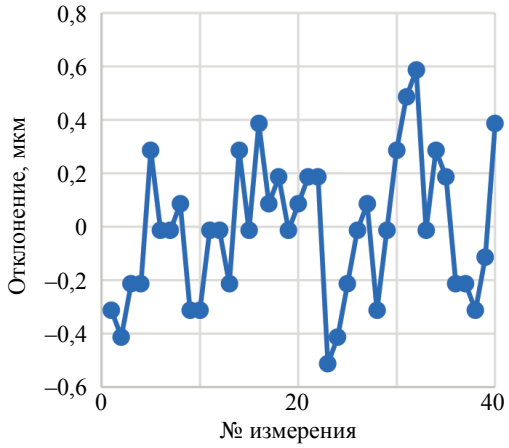


Рис. 4. Погрешность выставления нуля в процессе многократных измерений.

система выставления нуля, включающая в себя тензодатчик;

гистерезис перемещения ОО, обусловленный конструкцией актуатора;

дифференциальная нелинейность шарикововинтовой передачи (ШВП) актуатора.

Исследование прецизионности выставления нуля производилось путем многократных выставлений нуля (рис. 4). Прецизионность выставления нуля характеризуется размахом 1,1 мкм и СКО порядка 0,2 мм.

Компенсация отклонения выставления нуля проводится путем определения фактического положения нуля с помощью анализа тренда амплитуды сигнала ВТП средствами программного обеспечения толщиномера во время проведения градуировки.

Исследование и компенсация погрешности, определяемой гистерезисом перемещения образцового основания, осуществлялись с использованием инкрементного цифрового преобразователя линейных перемещений Sylcom P12D HR (P12D) путем сравнения заданного положения с измеренным (рис. 5).

Погрешность выставления положения, определяемая гистерезисом, составляет 4 мкм, гистерезис наблюдается при движении вверх до 15 мкм, при движении вниз — до 40 мкм. Компенсация этой погрешности производится путем выбирания гистерезиса (люфта) в процессе градуировки перед началом записи точек градуировочной характеристики и сохранением монотонности движения в течение проведения процедуры выставления точек градуировочной характеристики.

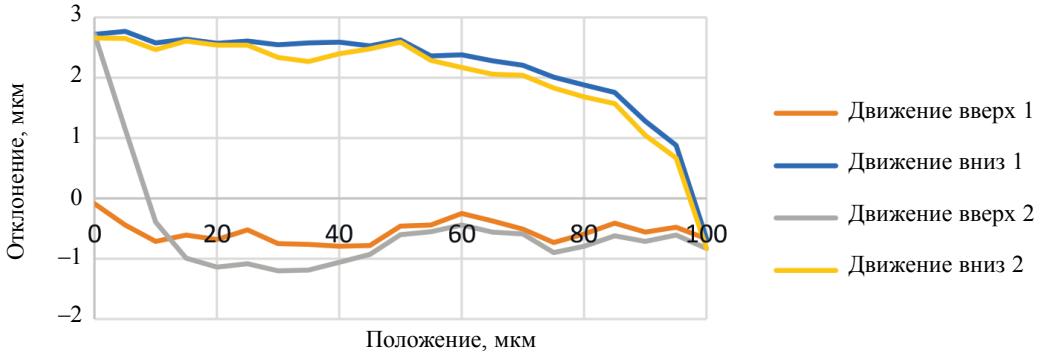


Рис. 5. Гистерезис перемещения образцового основания.

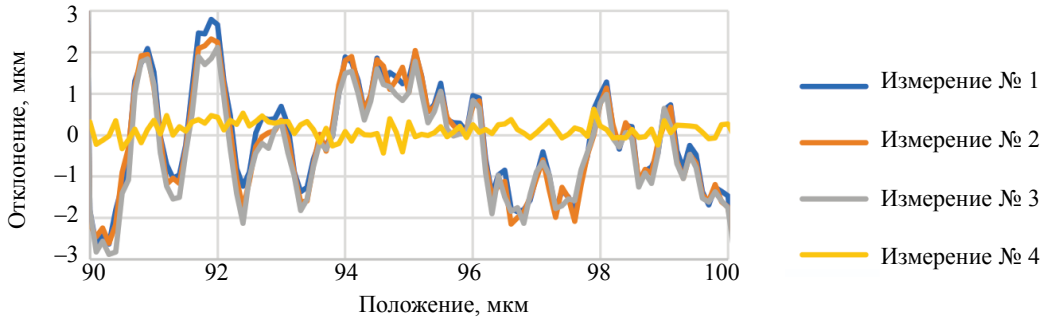


Рис. 6. Дифференциальная нелинейность актуатора и ее компенсация.

Исследование дифференциальной нелинейности актуатора проводилось с использованием инкрементного преобразователя линейных перемещений P12D (рис. 6).

Погрешность выставления положения, определяемая дифференциальной нелинейностью, не превышает ±3 мкм. Компенсация погрешности, определяемой дифференциальной нелинейностью актуатора, производится путем картирования винта ШВП (Screw mapping), при котором в память толщиномера вводится поправка, учитывающая его нелинейность. В процессе градуировки программа толщиномера определяет актуальное положение ОО относительно вала ШВП актуатора и компенсирует его дифференциальную нелинейность. На рис. 6 показана зависимость отклонения от положения ОО относительно вала ШВП до и после компенсации указанной погрешности.

Учитывая перечисленные составляющие погрешности, а также механизм их возникновения, была построена процедура градуировки толщиномера с использованием УИТП, временная диаграмма которой приведена на рис. 7.

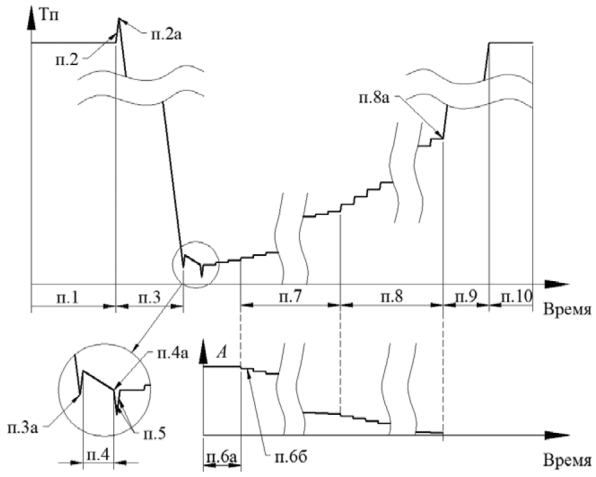


Рис. 7. Временная диаграмма процедуры градуировки толщиномера покрытий.

Процедура градуировки предусматривает: 1) установку ОО; 2) подведение ОО в крайнее положение (получение сигнала от концевого датчика); 3) грубое выставление нуля; 4) точное выставление нуля по сигналу касания от тензодатчика; 5) выбирание гистерезиса перемещения ОО; 6) начало ступенчатого изменения толщины покрытия (п. 6б — отрыв от контактной поверхности ВТП); 7) снятие градуировочных точек первой части диапазона измерения толщины покрытия с малым шагом; 8) снятие градуировочных точек второй и последующих частей диапазона измерения толщины покрытия с грубым шагом; 9) отвод ОО от ВТП; 10) замена ОО на следующее.

Поверка толщиномера производится аналогичным образом со следующими отличиями: используя универсальный последовательный интерфейс УПИ (интерфейс USB режим VCP) толщиномер подключается к компьютеру. В процессе поверки толщиномер передает в терминальную программу результаты измерений. Используя заготовленную форму обработки данных в программе Excel, формируется протокол поверки, производится расчет погрешности измерения и дается рекомендация о признании толщиномера годным или негодным к эксплуатации.

ВЫВОДЫ

Разработанная, изготовленная и исследованная установка-имитатор толщины диэлектрических покрытий, подключаемая к градуируемому толщиномеру с использованием двунаправленного интерфейса, реализует технологию автоматической градуировки вихретоковых толщиномеров с обеспечением метрологических характеристик, соответствующих современным требованиям производств, с отстройкой от влияния удельной электрической проводимости основания. Также предложена технология автоматизированной поверки указанных толщиномеров, обеспечивающая требования стандарта ГОСТ Р ИСО 2360—2021.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р ИСО 2360—2021 Неэлектропроводящие покрытия на немагнитных электропроводящих металлических основаниях. Измерение толщины покрытия. Амплитудный вихретоковый метод.

2. *Syasko M., Solomenchuk P., Soloviev I., Ampilova N.* A technique for multi-parameter signal processing of an eddy-current probe for measuring the thickness of non-conductive coatings on non-magnetic electrically conductive base metals // Appl. Sci. 2023. V. 13. P. 5144. https://doi.org/10.3390/app13085144

REFERENCE

1. GOST R ISO 2360—2021 Non-conductive coatings on non-magnetic electrically conductive base metals. Measurement of coating thickness. Amplitude-sensitive eddy-current method.

2. *Syasko M., Solomenchuk P., Soloviev I., Ampilova N.* A technique for multi-parameter signal processing of an eddy-current probe for measuring the thickness of non-conductive coatings on non-magnetic electrically conductive base metals // Appl. Sci. 2023. V. 13. P. 5144. https://doi.org/10.3390/app13085144