

УДК 620.192.63

Устройство контроля качества токопроводящих покрытий элементов ракетно-космической техники

Б.В. Скворцов, А.С. Самсонов, С.А. Борминский, Д.М. Живоносная

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,
Московское шоссе, 34, г. Самара 443086, Россия

Поступила 15.01.2018

Принята к печати 23.01.2019

Широкое применение криогенных топлив в аэрокосмической промышленности обуславливает необходимость дополнительной теплоизоляции топливных баков летательных аппаратов. При этом на теплоизолирующем слое в процессе эксплуатации может возникнуть статический заряд, что при утечке топлива может привести к взрыву. Для исключения подобных ситуаций на теплоизоляции наносится антистатическое токопроводящее покрытие. Целью работы являлась разработка устройства дистанционного контроля токопроводящего покрытия топливных баков летательных аппаратов, позволяющего оперативно находить и маркировать поврежденные участки.

Разработанная методика заключается в изменении электрической емкости между токопроводящим покрытием контролируемого объекта и сканирующим электродом. Она позволяет определять опасные с точки зрения искрообразования замкнутые по форме дефекты. Сформированы основные технические требования к устройству, а также обозначен требуемый минимальный размер контролируемого дефекта. Рассмотрены конструктивные особенности, необходимые для реализации устройства. Разработана структурная схема, на основе которой создан экспериментальный стенд емкостного контроля, основанный на мостовом методе измерений.

Представлены результаты конечно-разностного расчета электрического поля в структуре емкостного датчика при наличии дефекта, получена зависимость емкости датчика от его смещения над дефектным участком. Полученные экспериментальные данные подтвердили данные теоретических расчетов и корректность математической модели с точностью не хуже 5 %, абсолютная погрешность фиксации дефекта составляет ± 2 мм при скорости сканирования 0,02 м/с. Показано, что суммарная погрешность фиксации координат дефекта при различных положениях датчика воздушного зазора, температуры и скорости сканирования лежит в диапазоне 1,5–6,5 мм. Представленные в статье материалы позволяют повысить безопасность полетов за счет снижения вероятности искрообразования.

Ключевые слова: топливный бак, токопроводящее покрытие, дефекты, контроль, емкостной метод.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-23-31

Адрес для переписки:

Б.В. Скворцов
Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева,
Московское шоссе, 34, г. Самара 443086, Россия
e-mail: aps@ssau.ru

Address for correspondence:

B.V. Skvortsov
Samara National Research University,
Moskovskoye shosse, 34, Samara 443086, Russia
e-mail: aps@ssau.ru

Для цитирования:

Б.В. Скворцов, А.С. Самсонов, С.А. Борминский, Д.М. Живоносная.
Устройство контроля качества токопроводящих покрытий
элементов ракетно-космической техники.
Приборы и методы измерений.
2019. – Т. 10, № 1. – С. 23–31.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-23-31

For citation:

B.V. Skvortsov, A.S. Samsonov, S.A. Borminskiy,
D.M. Zhivonosnaya.
[Device for Conductive Coatings Quality Control of Rocket and
Space Technique Elements].
Devices and Methods of Measurements.
2019, vol. 10, no. 1, pp. 23–31 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-23-31

Device for Conductive Coatings Quality Control of Rocket and Space Technique Elements

B.V. Skvortsov, A.S. Samsonov, S.A. Borminskiy, D.M. Zhivonosnovskaya

*Samara National Research University,
Moskovskoye shosse, 34, Samara 443086, Russia*

Received 15.01.2018

Accepted for publication 23.01.2019

Abstract

The widespread use of cryogenic fuels in the aerospace industry necessitates additional thermal insulation of aircraft fuel tanks. At the same time a static charge may occur on the heat insulating layer during operation which can lead to an explosion if fuel leaks. To avoid such situations an antistatic conductive coating is applied to the insulation. The aim of the study is to develop a device for remote control of conductive coatings of aircraft fuel tanks which allows to quick find and mark damaged areas.

The developed method consists in changing the electrical capacitance between the conductive coating of the controlled object and the scanning electrode allowing to identify hazardous in terms of sparking closed shape defects. The basic technical requirements for the device were formed and the required minimum size of the monitored defect were indicated. The design features necessary for the implementation of the device were considered. A block diagram were developed on the basis of which an experimental bench for capacitive control were created which were is based on the bridge measurement method.

The article presents the results of the finite-difference calculation of the electric field in the structure of a capacitive sensor in the presence of a defect, the dependence of the capacitance of the sensor on its displacement over the defective area was also obtained. As the result of experimental studies the experimental data obtained confirmed the theoretical calculations and the correctness of the mathematical model with an accuracy of no worse than 5 %, the absolute error of fixing the defect ± 2 mm at a scanning speed of 0,02 m/s. Was shown that the total error of fixing the coordinates of the defect at different positions of the air gap sensor, temperature and scanning speed lies in the range of 1,5–6,5 mm. The materials presented in the article make it possible to increase flight safety by reducing the likelihood of sparking.

Keywords: fuel tank, conductive coating, defects, control, capacitive method.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-23-31

Адрес для переписки:

Б.В. Скворцов
Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева,
Московское шоссе, 34, г. Самара 443086, Россия
e-mail: aps@ssau.ru

Address for correspondence:

B.V. Skvortsov
Samara National Research University,
Moskovskoye shosse, 34, Samara 443086, Russia
e-mail: aps@ssau.ru

Для цитирования:

Б.В. Скворцов, А.С. Самсонов, С.А. Борминский, Д.М. Живоносновская.
Устройство контроля качества токопроводящих покрытий
элементов ракетно-космической техники.
Приборы и методы измерений.
2019. – Т. 10, № 1. – С. 23–31.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-23-31

For citation:

B.V. Skvortsov, A.S. Samsonov, S.A. Borminskiy,
D.M. Zhivonosnovskaya.
[Device for Conductive Coatings Quality Control of Rocket and
Space Technique Elements].
Devices and Methods of Measurements.
2019, vol. 10, no. 1, pp. 23–31 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-23-31

Введение

Защита от статического электричества является одной из основных задач современной авиакосмической промышленности. Одной из зон риска накопления заряда являются топливные баки летательных аппаратов, так как при использовании криогенных топлив подразумевается наличие слоя теплоизоляции, имеющей большое удельное сопротивление. Для предотвращения накопления статического заряда в процессе эксплуатации на теплоизолирующий слой топливного бака наносится токопроводящее покрытие (ТПП), для защиты которого снаружи наносится слой краски. Согласно ГОСТу, для исключения воспламенения смеси водорода с воздухом необходимо металлизировать внешние неметаллические части конструкций с площадью поверхности более $0,02 \text{ м}^2$ [1]. В процессе эксплуатации и транспортировки бака целостность ТПП может быть нарушена. В таком случае в месте дефекта начнет накапливаться статический заряд, что при утечке топлива может привести к взрыву. Контроль качества токопроводящего слоя является важной задачей, которая из-за наличия лакокрасочного покрытия не может быть решена визуальными и контактными методами. Под качеством ТПП в данной статье понимается отсутствие замкнутых дефектов.

Существует ряд известных методов неразрушающего контроля металлических изделий: радиационные, тепловые, ультразвуковые, магнитные, вихретоковые [2, 3]. Однако радиационные методы требуют биологической защиты, ультразвуковые – механического контакта, вихретоковые чувствительны к изменению толщины и равномерности токопроводящего покрытия. На крупногабаритных изделиях, таких как бак летательного аппарата, колебания толщины токопроводящей пленки составляют $0,05\text{--}0,1 \text{ мм}$, что приводит к большим погрешностям. В работах [4–7] описываются методы, основанные на бесконтактном сканировании контролируемых объектов емкостным датчиком, образованным подвижным электродом и контролируемой поверхностью. Однако в указанных работах отсутствует математическое описание электромагнитных процессов, определяющих формирование информационных сигналов для различных видов повреждений токопроводящего покрытия, нанесенного на диэлектрический материал.

Целью работы являлась разработка устройства дистанционного контроля токопроводящего покрытия топливных баков летательных аппаратов, позволяющего оперативно находить и маркировать поврежденные участки.

Основная часть

Исходя из требований искробезопасности, разрабатываемое устройство должно обеспечивать следующие метрологические и функциональные характеристики: минимальная площадь выявляемого дефекта $S \geq 0,01 \text{ м}^2$, минимальная площадь участка без ТПП $S_{\min} \geq 0,01 \text{ м}^2$, погрешность регистрации координаты внешних границ дефекта $\pm 2 \text{ мм}$, скорость контроля не менее $10 \text{ м}^2/\text{час}$, толщина ТПП $0,01\text{--}0,1 \text{ мм}$, толщина теплоизоляции $20\text{--}40 \text{ мм}$.

В работах [8–9] предложено устройство дефектоскопии ТПП топливных баков летательных аппаратов, принцип действия которого основан на расчете и анализе электрического поля в многослойной структуре датчика, по изменению которого можно судить о наличии либо отсутствии дефекта. В случае линейности и изотропности среды электрическое поле в датчике описывается уравнением, полученным в результате комплексного использования системы уравнений Максвелла [4]:

$$\mathbf{J} = \dot{\sigma}\mathbf{E}, \quad \mathbf{E} = -\text{grad}U, \quad \text{div}\mathbf{J} = \frac{\partial \rho_{cv}}{\partial t}, \quad \dot{\sigma} = \sigma + j\omega\epsilon, \quad (1)$$

где \mathbf{J} – вектор плотности тока в среде; U – скалярный потенциал поля; ρ_{cv} – концентрация свободных зарядов в среде; σ – проводимость каждой точки среды; ϵ – диэлектрическая проницаемость каждой точки среды; \mathbf{E} – напряженность электрического поля; ω – частота питания.

Тогда в дальнейшем из рассмотрения можно опустить время, а систему уравнений (2) заменить одним уравнением, которое получается в результате взаимных подстановок:

$$\text{div}(\dot{\sigma}\text{grad}U) = \text{div}[(\sigma + j\omega\epsilon)\text{grad}U] = \frac{(G + j\omega C)U_m}{V}, \quad (2)$$

где σ , ϵ , U – проводимость, диэлектрическая проницаемость и напряжение в каждой точке структуры датчика и вокруг него; G , C – суммарные проводимость и емкость датчика, определяемые с учетом полей рассеивания; V – объем электродов.

Общее решение складывается из действительной и мнимой составляющих решения уравнения (2) и определяет амплитуду и фазу

напряжения в каждой точке структуры датчика. Тогда комплексный суммарный ток датчика зависит от площади дефекта и конструктивных параметров согласно обобщенной функции:

$$\dot{I} = F(S_d, d_k, \sigma_k, \epsilon_k, \omega, U_m) = A(S_d, d_k, \sigma_k, \epsilon_k, \omega, U_m) e^{\phi(S_d, d_k, \sigma_k, \epsilon_k, \omega, U_m)}, \quad (3)$$

где S_d – площадь дефекта; d_k – толщина каждого слоя; σ_k, ϵ_k – проводимость и диэлектрическая проницаемость каждого слоя; ω, U_m – частота и напряжение питания датчика.

Выражения (2) и (3) представляют собой математическую основу метода контроля ТПП. В двумерном представлении задача сводится к расчету плоского поля. Для учета краевых эффектов решение проводилось численным методом в условно расширенной области, состоящей из датчика и ограниченного пространства вокруг него, влияние размера которого оценивалось численным экспериментом. Рассматриваемое пространство описывалось идентификационным массивом, определяющим проводимость $\sigma(x, z)$ и диэлектрическую проницаемость $\epsilon(x, z)$ в каждой точке поля. Решение проводилось методом конечных разностей (процесс Либмана) с нулевыми условиями на границах расширенной области. В результате определялась суммарная проводимость G и емкость C датчика при различных видах дефектов. Расчеты показали, что дефекты мало влияют на проводимость, зато емкость датчика существенно зависит от их размеров. В частности путем конечно-разностного расчета электрического поля определен закон изменения емкости при смещении электрода над замкнутым дефектом (рисунок 1). Моделирование проводилось в программной среде *Mathcad*.

Методика позволяет проводить расчеты при различных конструктивных параметрах и размерах дефектов. На основе численных расчетов и аналитических исследований дана оценка влияния паразитных емкостей на информационный сигнал датчика. Общую емкость между измерительным электродом и токопроводящим слоем можно рассматривать как параллельное соединение основной C_0 и паразитной C_p емкостей: $C = C_0 + C_p$. Паразитная емкость краевого эффекта для прямоугольного проводника определяется выражением (4):

$$C_p = \frac{1.113l}{8\pi} \cdot \left[\ln\left(\frac{8\pi l}{h}\right) - 3 + \left(1 + \frac{h_R}{h}\right) \ln\left(1 + \frac{h_R}{h}\right) - \frac{h_R}{h} \ln\left(\frac{h_R}{h}\right) \right] 10^{-12}, \quad (4)$$

где l, h_R – ширина и толщина измерительного электрода; $h = \sum d_k$ – расстояние от электрода до контролируемой поверхности.

Основная емкость при отсутствии дефекта на ТПП определяется выражением (5):

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{l^2}{\frac{d_B}{\epsilon_B} + \frac{d_L}{\epsilon_L}}, \quad (5)$$

где $d_B, d_L, \epsilon_B, \epsilon_L$ – толщина и диэлектрические проницаемости воздуха и лакокрасочного покрытия. Относительное значение паразитной емкости C_p можно определить как:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_0} = \frac{0,005[\ln(\frac{8\pi l}{d_B + d_L}) - 3]}{l} \left(\frac{d_B}{\epsilon} + \frac{d_L}{\epsilon_L}\right). \quad (6)$$

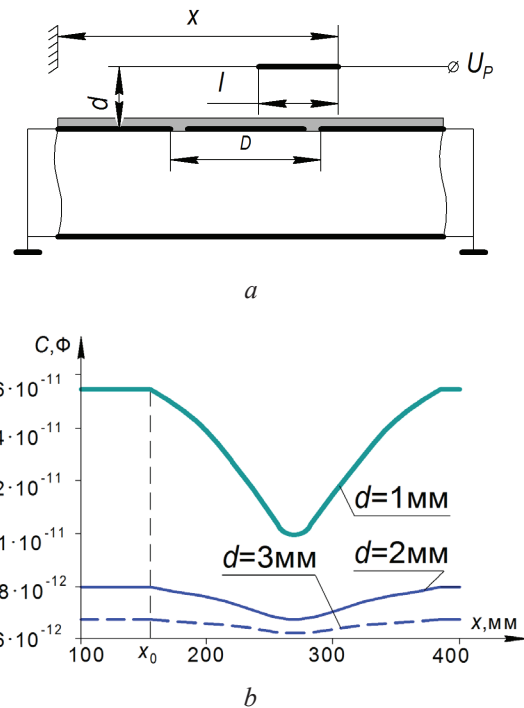


Рисунок 1 – Расположение дефекта (a) и изменение емкости датчика при перемещении над ним электрода (b) для $l = 100$ мм, $D = 140$ мм; l – ширина электрода; D – размер дефекта; x – расстояние между началом электрода и точкой отсчета; d – расстояние между электродом и токопроводящим покрытием

Figure 1 – The location of the defect (a) and the change in the capacitance of the sensor when the electrode moves over it (b) for $l = 100$ mm, $D = 140$ mm; l – the width of the electrode; D – the size of the defect; x – the distance between the beginning of the electrode and the reference point; d – the distance between the electrode and the conductive coating

Формула (6) позволяет выбрать такие значения ширины электрода l и толщины воздушного зазора d_L , при которых краевыми эффектами можно пренебречь с заданной погрешностью. Определены условия, при которых функцию преобразования, показанную на рисунке 1б, можно приближенно описать аналитически отрезками прямых. В этом случае математическая модель, аппроксимирующая график на рисунке 1б с погрешностью $\gamma < 1\%$, имеет вид (7):

$$C(x) = C_1 + C_2 + C_3, \quad (7)$$

где при $x \leq x_0$: $C_1 = \varepsilon_0 \frac{l^2}{A}$, $C_2 = 0$, $C_3 = 0$,

$$A = \frac{d_B}{\varepsilon_B} + \frac{d_L}{\varepsilon_L}, \quad B = \frac{d_P}{\varepsilon_P} + \frac{d_T}{\varepsilon_T};$$

при $x_0 \leq x \leq (x_0 + l)$: $C_1 = \varepsilon_0 \frac{l(l - x + x_0)}{A}$,

$$C_2 = \varepsilon_0 \frac{l(x - x_0)}{A + B}, C_3 = 0;$$

при $(x_0 + l) \leq x \leq (x_0 + D)$: $C_1 = 0$, $C_2 = \varepsilon_0 \frac{l^2}{A + B}$, $C_3 = 0$;

при $(x_0 + D) \leq x \leq (x_0 + l + D)$: $C_1 = 0$,

$$C_2 = \varepsilon_0 \frac{l(l - x - x_0 + D)}{A + B}, C_3 = \varepsilon_0 \frac{l(x - x_0 - D)}{A};$$

при $x \geq (x_0 + l + D)$: $C_1 = 0$, $C_2 = 0$, $C_3 = \varepsilon_0 \frac{l^2}{A}$,

где d_P , d_T , ε_P , ε_T – толщина и проводимость ТПП и теплоизоляции соответственно; x_0 – точка начала дефекта.

Сущность технического решения поясняется рисунком 2, где приведена обобщенная структурная схема.

На подвижной платформе 2, расположенной вблизи контролируемой поверхности бака 1, размещается датчик зазора 3, электрод емкостного датчика дефекта 4 и устройство маркировки 5, представляющее собой картридж, выбрасывающий краску по сигналу устройства 7, управляемого сигналом контроллера 6, на входы которого поступают сигналы с датчиков 3, 4, а также с датчиков положения платформы 9 и угла поворота бака 11, которые получают сигналы с электроприводов перемещения платформы 8 и поворота бака 10. Блок передает информацию на персональный компьютер 12. Датчик температуры 13 передает сигнал в блок управления, который корректирует сигналы емкостного датчика и датчика зазора. Бак дискретно вращается вокруг своей оси. Данные о состоянии ТПП записываются в виде таблицы либо диаграммы.

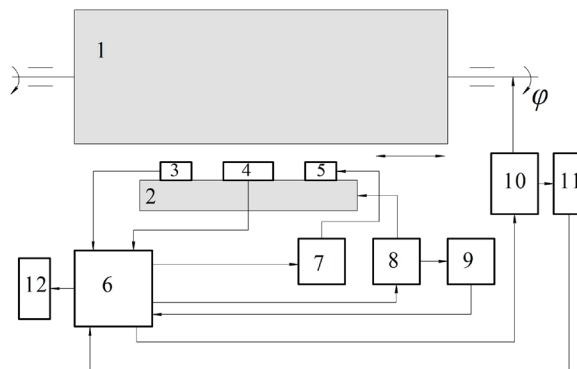


Рисунок 2 – Обобщенная структурная схема устройства контроля целостности токопроводящего покрытия: 1 – контролируемая поверхность бака; 2 – подвижная платформа; 3 – датчик зазора; 4 – электрод емкостного датчика дефекта; 5 – устройство маркировки; 6 – контроллер; 7 – управляющее устройство; 8 – электропривод перемещения платформы; 9 – датчик положения платформы; 10 – электропривод поворота бака; 11 – датчик угла поворота бака; 12 – персональный компьютер; 13 – датчик температуры

Figure 2 – A block diagram of the device monitoring the integrity of the conductive coating: 1 – controlled surface of the tank; 2 – mobile platform; 3 – gap sensor; 4 – electrode capacitive defect sensor; 5 – marking device; 6 – the controller; 7 – control device; 8 – electric movement of the platform; 9 – platform position sensor; 10 – electric rotation of the tank; 11 – tank gate angle sensor; 12 – personal computer; 13 – temperature sensor

Принцип работы устройства основан на измерении емкости и диэлектрических потерь между сканирующим электродом и контролируемой поверхностью. При конструировании устройств контроля ТПП следует использовать методы, основанные на переменном токе [10]. Для задач контроля ТПП наиболее пригодны параметрические методы, так как они имеют высокое быстродействие и не требуют специальных действий со стороны оператора измерительной установки.

На рисунке 3 показана структурная схема мостового параметрического устройства измерения емкости.

Генератор 1 питает переменным напряжением RC -мост, одним плечом которого является емкостной датчик 4, другим – параллельно включенные емкость C_{ST} и резистор R_{ST} , значения которых соответствуют емкости и проводимости датчика дефекта при выбранном зазоре и при отсутствии дефекта. Выходной сигнал, снимаемый с диагонали моста и зависящий от текущей емкости датчика, через усилитель подается

на вход сигнального процессора (контроллера дефекта), который содержит внутри себя аналого-цифровой преобразователь и вычисляет емкость с поправками на температуру и величину воздушного зазора, поступающими в него с датчиков 5 и 6 соответственно. При равновесии моста выходной сигнал равен нулю, в противном случае возникает напряжение, амплитуда которого равна $\Delta C = C_{ST} - C_X$. Если данное отклонение больше некоторого заданного значения ΔC_0 , определяемого при калибровке, то сигнальный процессор выдает импульс в базовый контроллер, который подает сигнал на устройство управления картриджем, отмечающем положение дефекта.

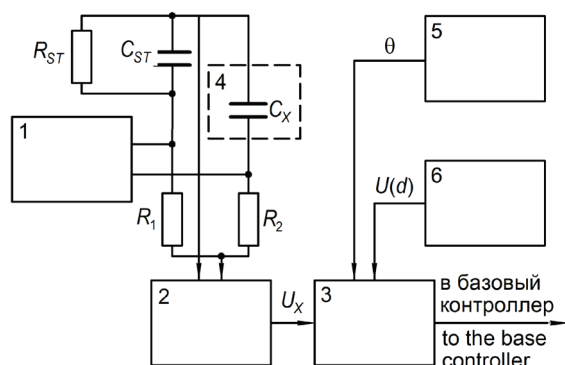


Рисунок 3 – Структурная схема устройства контроля в системе дефектоскопии токопроводящих покрытий: 1 – генератор; 2 – усилитель; 3 – сигнальный процессор; 4 – емкостной датчик дефекта; 5 – датчик температуры; 6 – датчик зазора

Figure 3 – Block diagram of the control device in the flaw detection system of conductive coatings: 1 – generator; 2 – power; 3 – signal processor; 4 – capacitive defect sensor; 5 – temperature sensor; 6 – gap sensor

Для привязки показаний датчика к конкретному виду ТПП и другим конструкционным параметрам (в частности, зазора и площади электрода) производится калибровка устройства. Выбор режима калибровки осуществляется вручную один раз перед запуском на контроль каждого изделия. Скорость сканирования выбрана таким образом, чтобы методическая погрешность идентификации дефекта не выходила за допустимые значения. В каждом такте измерительной процедуры в процессор вводится информация о текущем значении сигнала емкостного датчика дефекта U_x , величины зазора $d(x)$ и текущей температуры θ . Приведенный сигнал датчика можно записать как:

$$U_p = U_x + (\theta - \theta_0) k_\theta + (d - d_0) k_d, \quad (8)$$

где U_p , U_x – приведенное и реальное значения сигнала емкостного датчика; θ_0 , θ – сигналы, соответствующие нормальной и текущей температурам окружающей среды (обычно $\theta_0 = 20$); k_θ – температурный коэффициент, зависящий от конструктивных и технологических особенностей датчика; d_0 , d – сигналы, соответствующие эталонному и текущему зазорам в емкостном датчике; k_d – коэффициент, зависящий от конструктивных и технологических особенностей датчика.

Формула (8) справедлива при изменении зазора и температуры в пределах $\pm 10\%$ от базового значения.

Далее происходит вычитание кодов, соответствующих эталонному (бездефектному) и реальному значениям сигналов датчика дефекта $\Delta = U_0 - U_p$, и если разность превышает допустимое значение Δ_0 , то процессор выдает сигнал на включение картриджа, осуществляющего отметку дефекта. Выбором уровня Δ_0 можно настраивать систему на игнорирование малых дефектов, которые по техническим условиям не должны быть идентифицированы разрабатываемым устройством. Рассмотренная схема мало чувствительна к изменениям температуры и амплитуды напряжения питания.

Экспериментальные исследования

В рамках исследования проведен эксперимент, для которого были изготовлены макетные образцы емкостного датчика и устройства сканирования, которые базировались на лабораторном испытательном стенде.

В качестве макета токопроводящей пленки выбран стеклотекстолит марки FR4. Размер листа $350 \times 450 \times 1,5$ мм, толщина 18 мкм. Поверхность бака имитируется алюминиевым листом 600×800 мм, толщиной 1,5 мм, теплоизоляция – листом пенопласта толщиной 40 мм. Сканирующий электрод имеет размер 40×40 мм и зазор между контролируемой поверхностью 1,5 мм. Исследования проводились с помощью прибора E7-14, диапазон измерения емкости 10^{-15} –1 Ф, погрешность $< 0,1\%$. Измерения проводились на частоте 1 кГц.

Для уменьшения возникающей из-за подключающих проводов погрешности измерения сканирующий электрод и ТПП подключены по схеме, приведенной на рисунке 4 [11]. Для подключения электрода и ТПП выбраны

экранированные провода с одинаковой длиной. Лист, имитирующий бак, электрически соединен с ТПП перемычкой. Перед началом эксперимента мостовой измеритель иммитанса E7-14 калибруется в режиме минимального сопротивления путем короткого замыкания электрода и ТПП, затем проводится калибровка нуля – при этом измерительный электрод отводится от ТПП на значительное расстояние.

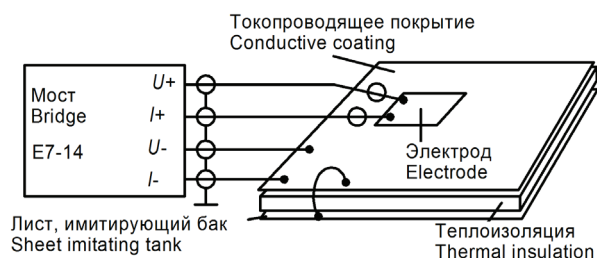


Рисунок 4 – Схема измерительного стенда

Figure 4 – The scheme of the measuring stand

В ходе эксперимента сначала исследовались краевые эффекты на неповрежденном участке ТПП, экспериментально определялись электрические параметры модели. При исследовании поврежденной поверхности, которая имела изолированный дефект размером 150×250 мм, датчик смещался над трещиной. На рисунке 5 приведен график, где сопоставляются экспериментальные и теоретические зависимости емкости от перемещения датчика над трещиной.

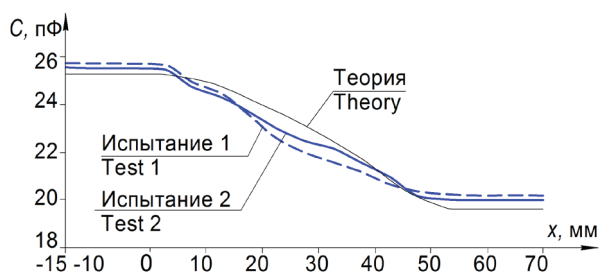


Рисунок 5 – Зависимость емкости от перемещения емкостного датчика над трещиной

Figure 5 – Dependence of capacity on displacement of a capacitive sensor above a crack

Проведены исследования, связанные с перемещением датчика над дефектами различных размеров. Дополнительно были проведены эксперименты с целью исследования емкости при изменении зазора между сканирующим электродом и поверхностью ТПП. Полученные результаты практических исследований подтвердили данные теоретических расчетов и корректность математической модели с точностью не хуже 5 %.

Созданный макетный образец устройства контроля целостности ТПП подтвердил возможность фиксации дефектов с погрешностью ± 2 мм при скорости сканирования меньше 0,02 м/с.

Сформулированы требования к точности выявления и обозначения местоположения дефекта, а также к комплектующим элементам устройства по погрешности и быстродействию. Дефект определяется по уменьшению емкости на величину заданного отклонения ΔC , по которой можно идентифицировать дефект, превышающий по размеру допустимую величину: $C_{\max} - C(x) < \Delta C$ – дефекта нет, $C_{\max} - C(x) \geq \Delta C$ – дефект есть.

При заданном ΔC погрешность фиксации координаты дефекта определится по формуле:

$$\Delta x = \frac{A(A+B)}{\epsilon_0 l(2A+B)} \Delta C. \quad (9)$$

Если размер электрода выбрать больше минимально допустимого дефекта D_0 , то подбирая порог идентификации дефекта $\Delta C \approx C'$, можно автоматически игнорировать мелкие дефекты, размер которых $D < D_0$. При $l = K_R \cdot D_0$, где $K_R > 1,0$ – коэффициент размера электрода, порог идентификации определится по формуле:

$$\Delta C = C'_{\min} = \epsilon_0 l D_0 \left(\frac{K_R - 1}{A} + \frac{1}{A+B} \right). \quad (10)$$

При этом будет иметь место систематическая аддитивная погрешность координаты дефекта:

$$\Delta_0 = D_0 \frac{K_R(A+B) - B}{2A+B}. \quad (11)$$

Систематическая погрешность компенсируется конструктивными методами. Корректирование температурной погрешности осуществляется путем введения сигнала датчика температуры и использования его в алгоритмах вычислений. Динамические погрешности определяются инерционностью процессов изменения емкости и схем обработки сигналов при перемещении электрода со скоростью v , определяющей общее время контроля изделия. При выбранном пороге ΔC , V и T возникнет ситуация, когда электрод «проскочит» дефект, при этом емкость не успеет измениться на величину, большую порогового значения ΔC . Формула (12) связывает скорость сканирования, допустимую динамическую погрешность Δx_d и конструктивные параметры датчика при $x_0 < x < (x_0 + l)$:

$$v = \frac{\Delta C(A+B) - l\varepsilon_0 \Delta x_d}{l\varepsilon_0 T \cdot \ln[1 - \frac{\Delta C(A+B)}{\Delta C(A+B) - l\varepsilon_0 \Delta x_d}]} \quad (12)$$

Зная заданную погрешность Δx_d и конструкционные параметры можно найти предельную скорость сканирования. Сводные значения погрешностей приведены в таблице.

Таблица/Table

Сводная таблица погрешностей
Summary table of errors

Причина погрешности Cause of error	Обозначение Designation	Значения, мм Values, mm	Примечание Note
Порог обнаружения Detection threshold	Δ_c	1,0–4,0	при $l = 0,1$ м
Датчик воздушного зазора Air gap sensor	Δ_B	0,2–0,8	
Температура Temperature	Δ_θ	0,0–0,7	$-10 < \theta < 50$ °C
Скорость сканирования Scan speed	Δ_d	1,0–5,0	$0,05 < V < 0,20$ м/с

Суммарная погрешность всей системы определяется по формуле:

$$\Delta_\Sigma = \sqrt{\Delta_C^2 + \Delta_B^2 + \Delta_\theta^2 + \Delta_d^2} = 1.48 \div 6.5 \text{ мм}, \quad (13)$$

Полученные значения являются завышенными, так как определены для самых неблагоприятных случаев, когда все виды погрешностей имеют максимальные составляющие компоненты.

Заключение

Разработано устройство контроля качества токопроводящих покрытий элементов ракетно-космической техники, которое за счет специфики методов емкостного контроля, обладающих максимальной чувствительностью к дефектам тонких токопроводящих покрытий, отличается возможностью оперативной настройки на исключение дефектов, надежностью, простотой технической реализации.

Представлены результаты конечно-разностного расчета электрического поля в структуре емкостного датчика при наличии дефекта. Выведены аналитические выражения, определяющие функцию преобразования датчика дефектов токопроводящих покрытий, которые подтвердили корректность конечно-разностных расчетов.

В результате экспериментальных исследований макетного образца устройства выявлено, что абсолютная погрешность фиксации дефекта составляет ± 2 мм при скорости сканирования 0,02 м/с, порог чувствительности зависит от размера сканирующего электрода и определяется конкретным техническим заданием. В целом метрологический анализ показал возможность создания устройства, позволяющего фиксировать границы дефекта с погрешностью, не превышающей $\Delta_\Sigma = \pm 3$ мм.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России. В статью включены результаты, полученные в рамках реализации государственного задания (номер проекта 8.2297.2017/4.6).

Список использованных источников

1. Овчаренко, А.Г. Электростатическая безопасность пожаро- и взрывоопасных производств / А.Г. Овчаренко. – Бийск : БТИ АлтГТУ, 2006. – 156 с.
2. Вавилов, В.Д. Микросистемные датчики физических величин / В.Д. Вавилов, С.П. Тимошенко, А.С. Тимошенко. – М. : Техносфера, 2018. – 500 с.
3. Шатерников, В.Е. Вихретоковый метод неразрушающего контроля тонколистовых металлических изделий / В.Е. Шатерников, С.В. Ключев. – М. : Машиностроение, 2007. – 173 с.
4. Ландау, Л.Д. Теоретическая физика. Том II. Теория поля / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 304 с.
5. Hegg, M.C. Remote monitoring of resin transfer molding processes by distributed dielectric sensors / M.C. Hegg [et al.] // Journal of Composite Materials. – 2005. – No. 39. – P. 1519–1539.
DOI: 10.1177/0021998305051083
6. Hegg, M.C. Influence of variable plate separation on fringing electric fields in parallel-plate capacitors / M.C. Hegg, A.V. Mamishev // Electrical Insulation, Conference Record of the 1988 IEEE International Symposium on. – 1998. – P. 384–387.
DOI: 10.1109/ELINSL.2004.1380606

7. Батищев, В.И. Измерение параметров емкостных датчиков положения и перемещения / В.И. Батищев, В.С. Мелентьев. – М. : Машиностроение. – 2005. – 124 с.

8. Самсонов, А.С. Контроль целостности токопроводящего покрытия топливных баков летательных аппаратов / А.С. Самсонов, Б.В. Скворцов // *Авиакосмическое приборостроение*. – 2015. – № 9. – С. 34–40.

9. Скворцов, Б.В. Проблемы дефектоскопического контроля токопроводящего покрытия топливных баков летательных аппаратов / Б.В. Скворцов [и др.] // *Известия СНЦ РАН*. – 2016. – Т. 18, № 1. – С. 114–118.

10. Афонский, А.А. Электронные измерения в нанотехнологиях и в микроэлектронике / А.А. Афонский, В.П. Дьяконов. – М. : ДМК Пресс. – 2012. – 688 с.

11. Цветков, Э.И. Метрология. Модели. Метрологический анализ. Метрологический синтез / Э.И. Цветков. – СПб. : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2014. – 293 с.

Acknowledgments

This paper is financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Grant No. 8.2297.2017/4.6).

References

1. Ovcharenko A.G. *EHlektrostaticheskaya bezopasnost' pozharo- i vzryvoopasnykh proizvodstv* [Electrostatic safety of fire and explosive industries]. Biysk, BTI AltGTU, 2006, 156 p.

2. Vavilov V.D., Timoshenkov S.P., Timoshenkov A.S. *Mikrosistemnye datchiki fizicheskikh velichin* [Microsystem sensors of physical quantities]. Moscow, Technosphere Publ., 2018, 500 p.

3. Shaternikov V.E., Klyuev S.V. *Vikhretokovyy metod nerazrushayushhego kontrolya tonkolistovykh metallicheskih izdelij* [Eddy current method of non-destructive

testing of thin sheet metal products]. Moscow, Engineering Publ., 2007, 173 p.

4. Landau L.D., Lifshits E.M. *Teoreticheskaya fizika. Tom II. Teoriya polya* [Theoretical physics. Volume II. Field theory]. Moscow, Physmatlit Publ., 2006, 304 p.

5. Hegg M.C., Ogale A., Mescher A., Mamishev A.V., Minaie B. Remote monitoring of resin transfer molding processes by distributed dielectric sensors. *Journal of Composite Materials*, 2005, no. 39, pp. 1519–1539.

DOI: 10.1177/0021998305051083

6. Hegg M.C., Mamishev A.V. Influence of variable plate separation on fringing electric fields in parallel-plate capacitors. *Electrical Insulation, Conference Record of the 1988 IEEE International Symposium on*, 1998, pp. 384–387.

DOI: 10.1109/ELINSL.2004.1380606

7. Batishchev V.I., Melentyev V.S. *Izmerenie parametrov emkostnykh datchikov polozheniya i peremesheniya* [Measurement of parameters of capacitive position and displacement sensors]. Moscow, Engineering Publ., 2005, 124 p.

8. Samsonov A.S., Skvortsov B.V. [Monitoring the integrity of the conductive coating of aircraft fuel tanks]. *Aviakosmicheskoe priborostroenie* [Aerospace Instrumentation], 2015, no. 9, pp. 34–40 (in Russian).

9. Skvortsov B.V., Samsonov A.S., Blinov D.I., Ilmurzina S.F. [Problems of flaw detection of conductive coating of aircraft fuel tanks]. *Izvestiya SNTS RAN* [News SSC RAS], 2016, vol. 18, no. 1, pp. 114–118 (in Russian).

10. Afonskiy A.A., D'yakonov V.P. *EHlektronnye izmereniya v nanotekhnologiyakh i v mikroelektronike* [Electronic measurements in nanotechnology and microelectronics]. Moscow, DMK Press Publ., 2012, 688 p.

11. Tsvetkov E.I. *Metrologiya. Modeli. Metrologicheskij analiz. Metrologicheskij sintez* [Metrology. Models. Metrological analysis. Metrological synthesis]. Publishing house SPbGETU «LETI», 2014, 293 p.