

УДК 620.192.63

СИСТЕМА ДЕФЕКТОСКОПИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ТОКОПРОВОДЯЩЕГО ПОКРЫТИЯ ТОПЛИВНЫХ БАКОВ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ И ЕЕ ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

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

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

Рассматривается метод контроля токопроводящего покрытия (ТПП) топливных баков летательных аппаратов. Дана конструкция устройства контроля ТПП и общее описание процесса сканирования. Произведена оценка влияния паразитной емкости на погрешность расчета. Приведены аналитические выражения, описывающие изменение емкости между ТПП и сканирующим электродом. Разработана программа моделирования процесса дефектоскопии, имитирующая проход сканирующей системы над топливным баком. Проведено исследование влияния скорости передвижения сканирующей платформы на погрешность контроля. Определена максимально допустимая скорость сканирования при заданной динамической погрешности.

Ключевые слова: топливный бак, токопроводящее покрытие, дефекты, контроль, емкостной метод, конструкция датчика, моделирование, динамическая погрешность.

Оперативный достоверный контроль целостности токопроводящих покрытий (ТПП) топливных баков ракетно-космических аппаратов является важной задачей, связанной с проблемами их безопасной эксплуатации, транспортировки и обслуживания, особенно при использовании криогенных топлив. Поверхность баков покрывают теплоизоляционным материалом с диэлектрическими свойствами. Для снятия статического электричества на теплоизоляцию наносится слой токопроводящего покрытия. В соответствии с ГОСТ необходимо металлизировать части конструкций, которые образуют внешний контур изделия с площадью поверхности более $0,2 \text{ м}^2$, а при использовании водородных топлив – с площадью поверхности более $0,02 \text{ м}^2$ [1]. На ТПП наносится лакокрасочное покрытие, что исключает визуальные и контактные методы контроля ее целостности. В процессе эксплуатации изделия, во время технологических переключений, транспортирования и обслуживания возможно появление на ТПП замкнутых трещин либо участков без покрытия. На дефектных участках скапливаются заряды статического электричества, которые могут привести к возгоранию в случае утечки или выброса топлива через пневмоклапаны. Для обеспечения сохранности изделия, наземного комплекса и людей необходим контроль целостности ТПП. Дополнительные трудности на диагностирование ТПП накладывают большие габариты контролируемого бака, которые могут составлять до 15 м длины и

Борис Владимирович Скворцов (д.т.н., проф.), научный руководитель НИЛ «Аналитические приборы и системы».

Александр Сергеевич Самсонов, аспирант.

Дарья Михайловна Живоносная, инженер НИЛ «Аналитические приборы и системы».

3 м в диаметре. Устройство должно также автоматически пропускать дефекты, площадь которых не превышает заданного значения, в частности $S_0 < 0,02 \text{ м}^2$, что в линейных размерах квадратной формы составляет $141 \times 141 \text{ мм}$.

В работе [2] описаны виды ТПП и дана классификация дефектов, которые могут иметь вид либо замкнутой трещины, либо отсутствия покрытия, полностью или частично скрытого наружным лакокрасочным материалом. В [3] дан обзор методов и устройств дефектоскопического контроля различных видов ТПП, где отмечено, что известные радиационные, ультразвуковые, магнитные, вихретоковые методы имеют существенное ограничение, особенно при контроле многослойных крупногабаритных изделий. В частности, вихретоковые методы критичны к толщине и равномерности ТПП. На баках летательного аппарата колебания толщины токопроводящей пленки составляют 0,05–0,1 мм, что делает применение вихретоковых методов невозможным из-за больших погрешностей. Кроме того, вихретоковые методы фиксируют все дефекты подряд, что нецелесообразно для решения поставленной задачи и увеличивает время контроля.

Разработано устройство, защищенное патентом [4], реализующее емкостной метод контроля целостности ТПП (рис. 1).

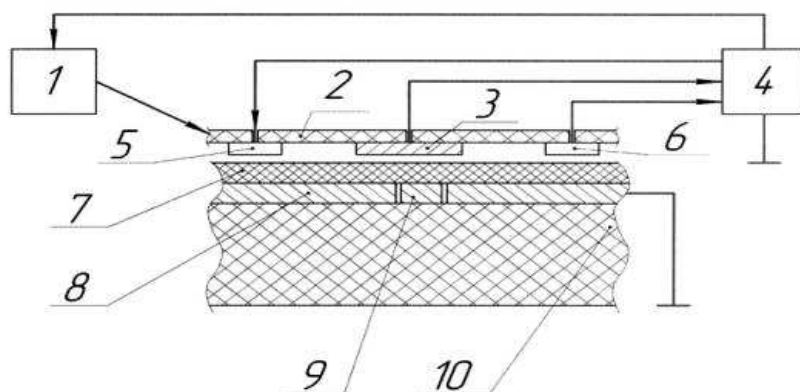


Рис. 1. Устройство контроля ТПП

Здесь электрод 3 перемещается платформой 2 вдоль токопроводящего покрытия 8 с зазором, контролируемым датчиком 6. Платформа 2 перемещается по сигналам устройства управления и обработки 4, в которое с электрода 3 поступает сигнал, пропорциональный текущему значению емкости конденсатора, образованного электродом 3 и ТПП 8, а также с датчика 6 сигнал, пропорциональный расстоянию между ними. Фиксируемые значения $C_{\text{тек}}$ непрерывно сравниваются в устройстве обработки 4 с эталонным значением емкости $C_э$ и вычисляется разность $\Delta C_{\text{тек}} = C_э - C_{\text{тек}}$. Устройство обозначения дефекта 5 маркирует на слое защитного покрытия 7 дефектную область по сигналу устройства обработки 4, который появляется в случае, если выполняется неравенство $\Delta C_{\text{тек}} \geq \Delta C_{\text{дон}}$, где $\Delta C_{\text{дон}}$ – максимально допустимое значение $\Delta C_{\text{тек}}$, выбираемое исходя из требуемой чувствительности устройства. Предложенное изобретение позволяет повысить точность контроля за счет применения датчика воздушного зазора. В схеме: 9 – участок ТПП с дефектом, 10 – теплоизоляция.

В общем случае суммарный ток датчика зависит от площади дефекта и конструктивных параметров обобщенной функцией

$$I_{\Sigma} = F(S_{\partial}, d_k, \sigma_k, \varepsilon_k, \omega, U_m) = A(S_{\partial}, d_k, \sigma_k, \varepsilon_k, \omega, U_m) e^{j\phi(S_{\partial}, d_k, \sigma_k, \varepsilon_k, \omega, U_m)}, \quad (1)$$

где S_0 – площадь дефекта; d_k – толщина каждого слоя; σ – проводимость и диэлектрическая проницаемость каждого слоя; f – частота и напряжение питания датчика.

Общий процесс контроля иллюстрируется рис. 2, согласно которому платформа 2 перемещается вдоль поверхности специальным координатно-позиционирующим устройством, управляемым электроприводом 8 с датчиком положения 9.

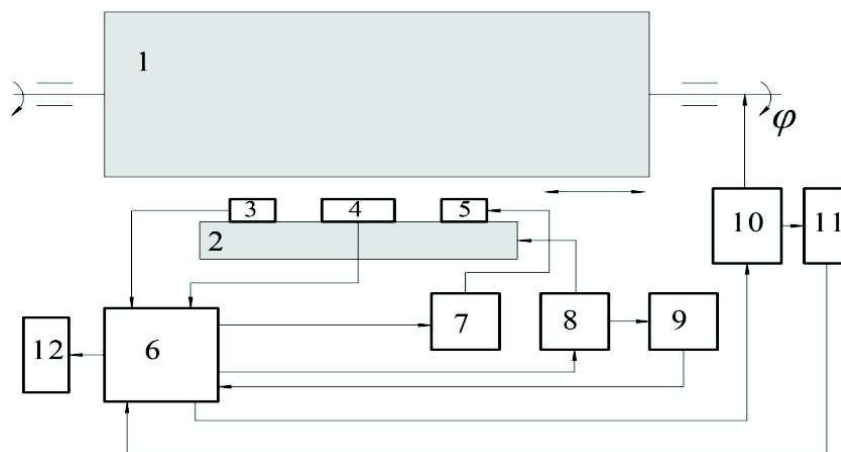


Рис. 2. Структурная схема системы контроля ТПП топливного бака:

1 – топливный бак; 2 – сканирующая платформа; 3 – датчик зазора; 4 – емкостной датчик (сканирующий электрод); 5 – форсунка; 6 – блок управления; 7 – устройство управления картриджем; 8 – электропривод платформы; 9 – датчик положения; 10 – электропривод поворота бака; 11 – датчик угла поворота; 12 – компьютер

При проходе датчика по всей длине бак поворачивается электроприводом 10 на фиксированный угол, определяемый размером электрода, и процесс сканирования повторяется. Если под электродом оказывается дефект, то форсунка делает на баке линию, соответствующую его длине по траектории сканирования.

Расчеты, проведенные на основе анализа электрического поля в структуре датчика, показанного на рис. 1, с учетом рассеивания показали, что дефекты мало влияют на проводимость, зато емкость датчика существенно зависит от их размеров. График изменения емкости при смещении электрода над замкнутым дефектом показан на рис. 3.

На основе численных расчетов, а также аналитических исследований [5] дана оценка влияния паразитных емкостей на информационный сигнал датчика. Показано, что относительное значение паразитной емкости C_{II} определится

$$\gamma = \frac{C_{II}}{C_0} = \frac{0,005[\ln(\frac{8\pi b}{d_B + d_L}) - 3]}{b} (\frac{d_B}{\epsilon_B} + \frac{d_L}{\epsilon_L}), \quad (2)$$

где d_B , d_L , ϵ_B , ϵ_L – толщина и диэлектрические проницаемости воздуха и лакокрасочного покрытия.

Формула (2) позволяет выбрать такие значения ширины электрода b и толщины воздушного зазора d_0 , при которых полем рассеивания можно пренебречь с заданной погрешностью. Определены условия, при которых функцию преобразования, показанную на рис. 3б, можно описать аналитически [6]:

$$C(x) = C_1 + C_2 + C_3, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{при } x \leq x_0 \quad C_1 &= \varepsilon_0 \frac{b^2}{A}, C_2 = 0, C_3 = 0; A = \frac{d_e}{\varepsilon_e} + \frac{d_n}{\varepsilon_n}, B = \frac{d_{II}}{\varepsilon_{II}} + \frac{d_T}{\varepsilon_T}; \\ \text{при } x_0 \leq x \leq x_0 + b \quad C_1 &= \varepsilon_0 \frac{b(b-x+x_0)}{A}, C_2 = \varepsilon_0 \frac{b(x-x_0)}{A+B}, C_3 = 0; \\ \text{при } x_0 + b \leq x \leq x_0 + D \quad C_1 &= 0, C_2 = \varepsilon_0 \frac{b^2}{A+B}, C_3 = 0; \\ \text{при } x_0 + D \leq x \leq x_0 + b + D \quad C_1 &= 0, C_2 = \varepsilon_0 \frac{b(b-x+x_0+D)}{A+B}, C_3 = \varepsilon_0 \frac{b(x-x_0-D)}{A}; \\ \text{при } x \geq x_0 + b + D \quad C_1 &= 0, C_2 = 0, C_3 = \varepsilon_0 \frac{b^2}{A}. \end{aligned}$$

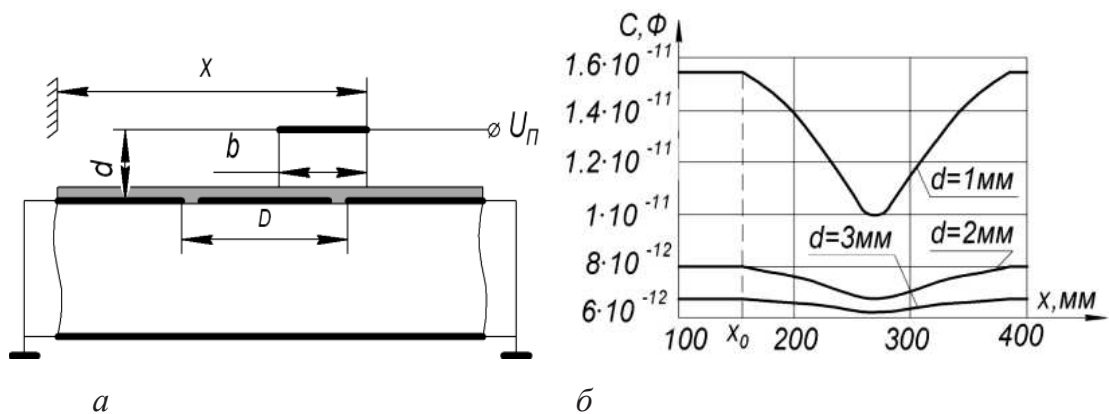


Рис. 3. Изменение емкости датчика при перемещении электрода над дефектом при $b = 100$ мм, $D = 140$ мм, b – ширина электрода, d – воздушный зазор, D – размер дефекта, x_0 – начальная координата дефекта

Приближенная математическая модель (3) аппроксимирует график на рис. 3б отрезками прямых с погрешностью $\gamma < 1\%$, что свидетельствует о корректности разработанных теоретических положений.

График на рис. 3б иллюстрирует функцию преобразования емкостного датчика $C(x)$ при скорости сканирования много меньшей скорости инерционных процессов схем обработки сигнала. Скорость сканирования является важнейшим параметром процедуры контроля, влияющим на информационные сигналы. Разработана программа в среде MATLAB – SIMULINK, которая позволяет произвести моделирование процедуры дефектоскопии, сущность которой состоит в том, что программа имитирует сигналы, описывающие движение платформы с электродом, датчиком воздушного зазора и картриджем с краской над поверхностью бака. При прохождении измерительной системы над областью, содержащей дефект, емкость между электродом и ТПП падает (рис. 3б) и система производит маркировку проблемного участка бака краской. Функциональная схема моделирования приведена на рис. 4.

При старте блок 1 начинает производить отсчет времени моделирования. Сигнал с блока 1 поступает на блок 3 и одновременно на блок 2. Блок 2 содержит массив данных, описывающий изменение скорости во времени. Блок 3 производит умножение параметров «скорость» и «время». Таким образом, на выход блока 3 поступает координата начала электрода x , после чего сигнал поступает в подсистему 4, которая производит остановку сканирования при достижении электродом края платформы. При условиях, удовлетворяющих продолжению моделирования, сигнал, представляющий собой изменяющуюся во времени ко-

ординату электрода, поступает в подсистемы 5 и 7, моделирующие работу емкостного датчика дефекта и датчика зазора.

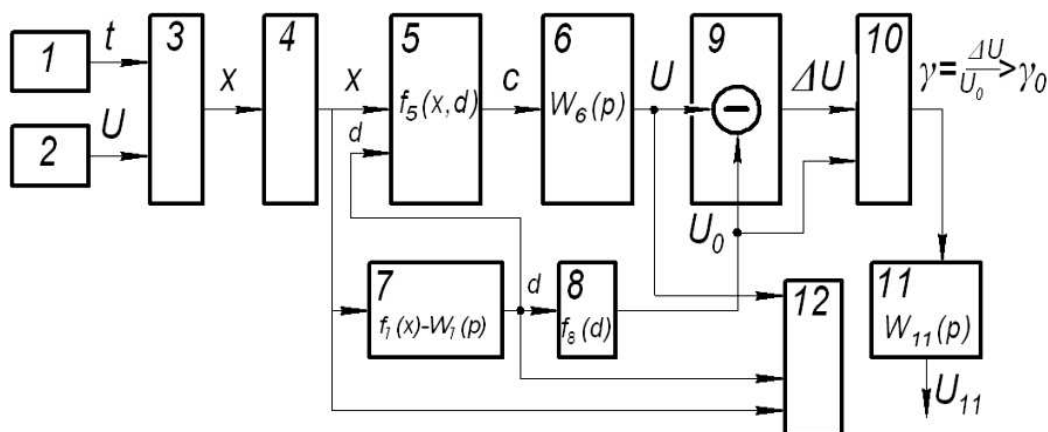


Рис. 4. Функциональная схема программы моделирования процесса контроля ТПП:

1, 2 – блоки задания времени и скорости; 3 – блок умножения; 4 – подсистема «стоп»; 5 – емкостной датчик; 6 – звено преобразования емкости; 7 – датчик зазора; 8 – звено формирования опорного сигнала; 9 – сравнивающее устройство; 10 – устройство обработки; 11 – устройство управления форсункой; 12 – блок записи

В блоке 5 табличной функцией $F_5(x, d)$ задается закон изменения емкости от координаты x и зазора d . Эта функция моделирует расположение дефекта, который имеет вид, показанный на рис. 3а. При отсутствии дефекта $F_5(x, d) = Const$ динамическое звено преобразования емкости в электрический сигнал описывается передаточной функцией $W_6(p) = \frac{k_6}{(T_6 p + 1)}$. В блоке 7 изменение зазора по координате задается табличной функцией $F_7(x)$, значение которой преобразуется в электрический сигнал динамическим звеном с передаточной функцией $W_7(p) = \frac{k_7}{(T_7 p + 1)}$. Функция $F_7(x)$ моделирует изгибы поверхности относительно эталонного значения, в идеальном случае $F_7(x) = Const$. В звене формирования опорного сигнала U_0 моделируется функция $F_8(d)$, которая показывает, как нужно скорректировать эталонное значение сигнала при изменении зазора, чтобы его изменение не было принято как дефект, при $d = Const$, $F_8(d) = Const$. Сравнивающее устройство вычитает сигналы, соответствующие текущему и эталонному для текущего зазора значениям емкости датчика $\Delta U = U_0 - U$. Устройство обработки осуществляет вычисление относительного отклонения ε и его анализ, на основе которого при $\gamma > \gamma_0$ выдает сигнал управления на форсунку, которая делает отметку о наличии дефекта. Устройство управления форсункой моделируется звеном запаздывания $W_{11}(p) = e^{-p\tau}$. Блок записи фиксирует в виде протокола текущее значение емкости и зазора в зависимости от координаты поверхности. Разработанная модель позволяет исследовать устройство при изменении следующих параметров: скорость перемещения платформы, неровности поверхности, дефекты токопроводящего покрытия бака, инерционность датчиков и исполнительного устройства. Исследовано влияние скорости сканирования и постоянных времени датчиков на информационные сигналы и погрешность определения координат дефекта, результаты показаны на рис. 5.

Из графика видно, что увеличение скорости сканирования V и постоянных времени T схем обработки приводит к уменьшению амплитуды изменения сигнала дефекта и смещению его по направлению сканирования. При увеличении скорости V и постоянных времени звеньев T уменьшается минимальное значение

емкости, соответствующее наличию дефекта на поверхности. Также смещается координата центра дефекта. При $V \rightarrow \infty$ или $T \rightarrow \infty$ разность между максимальным и минимальным значениями емкости стремится к нулю ($\Delta C_0 = C_{\text{MAX}} - C_{\text{MIN}} \rightarrow 0$). При выбранном пороге ΔC и каких-то значениях V и T возникнет ситуация, когда электрод «проскочит» дефект, при этом емкость не успеет измениться на величину, большую порогового значения ΔC . Получена формула, связывающая скорость сканирования, допустимую динамическую погрешность Δx_D и конструкционные параметры датчика:

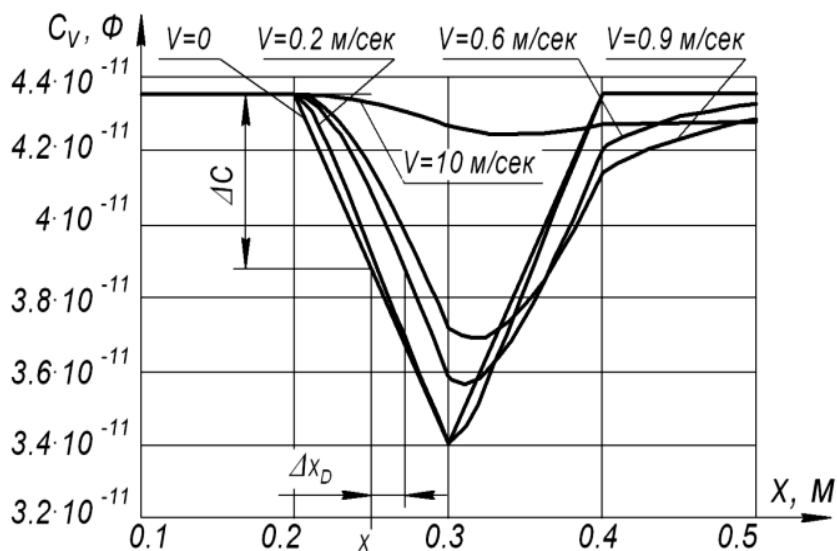


Рис. 5. Изменение емкости при различных скоростях сканирования, $D = b$, $T = T_6 = T_7 = 0.1$ сек

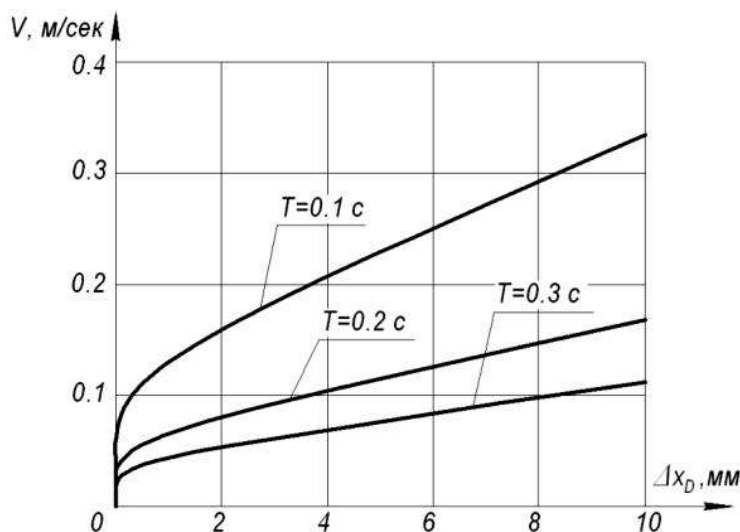


Рис. 6. График определения предельной скорости сканирования по заданной динамической погрешности

$$V = \frac{\Delta C(A+B) - b\varepsilon_0 \Delta x_D}{b\varepsilon_0 T \cdot \ln\left[1 - \frac{\Delta C(A+B)}{\Delta C(A+B) - b\varepsilon_0 \Delta x_D}\right]} \quad (4)$$

Формула (4) справедлива при $x_0 < x < x_0 + b$. По заданной погрешности Δx_D и известным конструкционным параметрам можно найти предельную скорость сканирования. График изменения скорости сканирования в зависимости от динамической погрешности при различных T показан на рис. 6.

Анализ данных моделирования показал, что устройство производит маркировку в пределах местонахождения дефекта, заданного блоком 5 на рис. 4, и что результаты не зависят от изменения зазора. Разработанная имитационная модель позволяет исследовать в динамическом режиме влияние многих конструкционных и схемотехнических параметров на точность и достоверность идентификации дефектов, проводить выбор параметров, оптимизацию режимов сканирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Каргин Н.Т., Волоцунев В.В. Конструкция и проектирование изделий ракетно-космической техники. Ч. 1. Конструирование изделий ракетно-космической техники: электрон. учеб. пособие. – Самара, 2012. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).
2. Самсонов А.С., Скворцов Б.В. Контроль целостности токопроводящего покрытия топливных баков летательных аппаратов // Авиакосмическое приборостроение. – 2015. – № 9. – С. 34–40.
3. Скворцов Б.В., Самсонов А.С., Блинов Д.И. Проблемы дефектоскопического контроля токопроводящего покрытия топливных баков летательных аппаратов // Известия СНЦ РАН. – 2016. – № 9. – С. 34–40.
4. Пат. 159780 Российская Федерация, МПК G01N27/24. Устройство контроля целостности токопроводящего покрытия на диэлектрическом материале / Б.В. Скворцов, А.С. Самсонов, Д.И. Блинов. – № 2015154359/28; заявл. 17.12.15; опубл. 20.02.16, Бюл. № 5. – 2 с.
5. Мишин А.И. Математическое моделирование процессов рассеяния энергии в тонкопленочных электролюминесцентных конденсаторах: Дис. ... канд. техн. наук. – Ульяновск, 2007. – 106 с.
6. Батищев В.И., Мелентьев В.С. Измерение параметров емкостных датчиков положения и перемещения. – М: Машиностроение-1, 2005. – 124 с.

Статья поступила в редакцию 1 апреля 2016 г.

FLAW DETECTION CONTROL SYSTEM OF CONDUCTIVE COATING OF AIRCRAFT FUEL TANKS AND ITS SIMULATION MODELING

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

S.P. Korolyov Samara State University
34, Moskovskoye sh., Samara, 443086, Russian Federation

The conductive coating control method of the aircraft fuel tanks is discussed. Monitoring device construction and a general description of the scanning process are given. The effect of stray capacitance on the calculation error is made. The analytical equations describing the change in the capacitance between the conductive coating and scanning electrode are provided. A program of flaw detection of the modeling process simulating the passage of the scanning system over the fuel tank is developed. A maximum scanning velocity at given dynamic error is defined.

Keywords: *fuel tank, conductive coating defects, control, capacitive method, sensor construction, simulation, dynamic error.*

*Boris V. Skvortsov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Alexander S. Samsonov, Postgraduate Student.
Driya M. Zhivonosnovskaya, Engineer.*