

## МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УСТРОЙСТВА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТОКОПРОВОДЯЩИХ ПОКРЫТИЙ ТОПЛИВНЫХ БАКОВ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

©2017

- А. С. Самсонов** кандидат технических наук, ведущий инженер-конструктор;  
Ракетно-космический центр «Прогресс», г. Самара  
[mail@samspace.ru](mailto:mail@samspace.ru)
- Д. И. Блинов** кандидат технических наук, инженер-конструктор;  
Ракетно-космический центр «Прогресс», г. Самара  
[mail@samspace.ru](mailto:mail@samspace.ru)
- Б. В. Скворцов** доктор технических наук, профессор кафедры электротехники;  
Самарский национальный исследовательский университет  
имени академика С.П. Королёва;  
[aps@ssau.ru](mailto:aps@ssau.ru)
- Д. М. Живоносная** аспирант кафедры электротехники;  
Самарский национальный исследовательский университет  
имени академика С.П. Королёва  
[aps@ssau.ru](mailto:aps@ssau.ru)

Рассматривается и теоретически обосновывается метод и устройство неразрушающего контроля токопроводящих покрытий топливных баков летательных аппаратов. Приведено запатентованное техническое решение и отображена сущность измерительной процедуры, заключающейся в сканировании поверхности электродом, образующим конденсатор с контролируемым материалом. Дана математическая модель, описывающая процесс дефектоскопии замкнутого дефекта при различной величине сканирующего электрода. Проведён метрологический анализ разрабатываемого устройства, рассматривающий основные и дополнительные погрешности, влияющие на результаты измерительной процедуры. Под основными погрешностями подразумеваются погрешность определения координаты дефекта и систематическая аддитивная (методическая) погрешность. Под дополнительными погрешностями понимаются температурная и динамическая. Среди всех типов погрешностей, возникающих в процессе дефектоскопии, выделены наиболее существенные. Предложены методы компенсации различных типов погрешностей конструкционным или алгоритмическим путём. Произведён численный анализ рассмотренных в статье погрешностей, доказывающий возможность локализации дефектов с погрешностью  $\leq 6,5$  мм. Составлена сводная таблица основных типов погрешностей.

*Летательный аппарат; топливный бак; токопроводящее покрытие; дефекты; контроль; ёмкостный метод; конструкция датчика.*

---

**Цитирование:** Самсонов А.С., Блинов Д.И., Скворцов Б.В., Живоносная Д.М. Метрологический анализ устройства неразрушающего контроля токопроводящих покрытий топливных баков летательных аппаратов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2017. Т. 16, № 3. С. 197-208. DOI: 10.18287/2541-7533-2017-16-3-197-208

### Введение

В настоящее время в ракетной технике космического назначения активно применяются криогенные компоненты топлива (например, водород и кислород) [1]. Для предотвращения перегрева топлива поверхность баков покрывают теплоизоляционным материалом, на который наносится токопроводящее покрытие (ТПП). В результате воздействия суточного перепада температуры, механических воздействий и прочих факторов на поверхности ТПП могут возникнуть замкнутые дефекты, на которых образуются локальные заряды статического электричества. Скапливаясь на дефектных участках ТПП, локальные заряды статического электричества могут привести к образованию

разрядной искры и возгоранию изделия. В соответствии с требованиями ГОСТ [2] необходимо металлизировать неметаллические части конструкций, которые образуют внешний контур изделия с площадью наружной поверхности более  $0,2 \text{ м}^2$ , а при использовании водородных топлив, для исключения воспламенения смеси водорода с воздухом, с площадью поверхности более  $0,02 \text{ м}^2$  [3]. В работе [4] описаны виды ТПП и дана классификация дефектов, которые могут иметь вид замкнутой трещины, полностью или частично скрытой лакокрасочным материалом.

### Сущность технического решения

Несмотря на разнообразие методов и устройств контроля ТПП [5], в рассматриваемой области стоит выделить следующие особенности и проблемы. Топливные баки имеют сложную форму и размеры высотой 10-15 м, диаметром 2-4 м, что по площади составляет  $31-106 \text{ м}^2$ . В зависимости от климатических факторов баки меняют свои размеры, что приводит к изменению функционального зазора в бесконтактном датчике контроля поверхности. Структура покрытия топливного бака многослойная, при этом каждый слой вносит свою составляющую в сигнал ёмкостного бесконтактного датчика. Толщина каждого из слоёв также неравномерна и может колебаться в пределах  $\pm 10 \%$  от номинального значения. Также на ТПП наносится лакокрасочное покрытие, что делает невозможным использование визуальных и контактных методов контроля его целостности. Следует учесть, что устройство должно автоматически пропускать дефекты, площадь которых не превышает заданного значения, в частности  $S_0 < 0,02 \text{ м}^2$ . Решение данных проблем связано с использованием бесконтактных, ёмкостных методов измерения, использующих робототехнические сканирующие координатные системы в сочетании с новыми методами обработки сигналов. Ниже приведено техническое решение [6]. Сущность изобретения поясняется рис. 1.

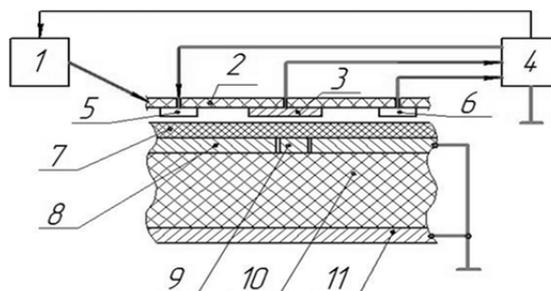


Рис. 1. Устройство контроля целостности ТПП с регулированием величины воздушного зазора: 1 – устройство управления платформой КПУ; 2 – платформа КПУ; 3 – подвижный электрод; 4 – устройство обработки; 5 – устройство обозначения области расположения дефекта; 6 – датчик контроля расстояния; 7 – защитное диэлектрическое покрытие; 8 – контролируемое ТПП; 9 – участок ТПП с замкнутым дефектом; 10 – диэлектрический материал; 11 – металлический корпус бака

Устройство работает следующим образом. Электрод 3 перемещается платформой координатно-позиционирующего устройства (КПУ) 2 вдоль токопроводящего покрытия 8 с постоянным зазором, контролируемым датчиком расстояния 6. Платформа КПУ 2 перемещается устройством управления 1 по сигналам, получаемым с устройства обработки 4. В устройство обработки 4 с электрода 3 поступает сигнал, пропорциональный текущему значению ёмкости конденсатора  $C_{\text{тек}}$ , образованного плоским электродом 3 и токопроводящим покрытием 8, а с датчика 6 поступает сигнал, пропорциональный расстоянию между ними. Фиксируемые значения  $C_{\text{тек}}$  непрерывно сравниваются в устройстве обработки 4 с эталонным значением ёмкости  $C_3$ , и вычисляется текущее значение

разности  $\Delta C_{\text{тек}}$ :  $\Delta C_{\text{тек}} = C_3 - C_{\text{тек}}$ . Значение эталонной ёмкости  $C_3$  определяется в результате калибровки устройства или расчётным путём. Устройство обозначения области расположения дефекта 5 маркирует на слое защитного диэлектрического покрытия 7 дефектную область по сигналу устройства обработки 4. Этот сигнал появляется в случае, если выполняется неравенство  $\Delta C_{\text{тек}} \geq \Delta C_{\text{доп}}$ , где  $\Delta C_{\text{доп}}$  – максимально допустимое значение  $\Delta C_{\text{тек}}$ , выбираемое исходя из совокупности факторов, влияющих на точность измерения  $\Delta C_{\text{тек}}$ , и требуемой чувствительности устройства.

### Математическое моделирование измерительной процедуры

Описание закона изменения ёмкости при перемещении электрода над дефектом приведено на рис. 2.

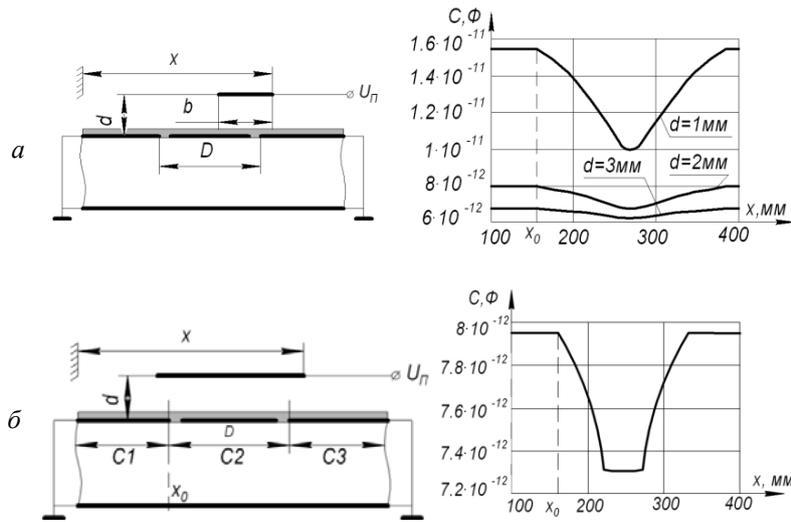


Рис. 2. Ёмкость датчика при перемещении электрода над замкнутым дефектом:  
 $a - b=100$  мм,  $D=140$  мм;  $b - d=2$  мм,  $b=100$  мм,  $D=50$  мм

Если дефект больше электрода ( $b < D$ , рис. 2, а), то математическая модель примет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} C(x) = C_1 + C_2 + C_3, \\ \text{при } x \leq x_0 \quad C_1 = \varepsilon_0 \frac{b^2}{A}, C_2 = 0, C_3 = 0; \\ \text{при } x_0 \leq x \leq x_0 + b \quad C_1 = \varepsilon_0 \frac{b(b-x+x_0)}{A}, C_2 = \varepsilon_0 \frac{b(x-x_0)}{A+B}, C_3 = 0; \\ \text{при } x_0 + b \leq x \leq x_0 + D \quad C_1 = 0, C_2 = \varepsilon_0 \frac{b^2}{A+B}, C_3 = 0; \\ \text{при } x_0 + D \leq x \leq x_0 + b + D \quad C_1 = 0, C_2 = \varepsilon_0 \frac{b(b-x+x_0+D)}{A+B}, C_3 = \varepsilon_0 \frac{b(x-x_0-D)}{A}; \\ \text{при } x \geq x_0 + b + D \quad C_1 = 0, C_2 = 0, C_3 = \varepsilon_0 \frac{b^2}{A}, \end{array} \right. \quad (1)$$

где

$$A = \frac{d_B}{\varepsilon_B} + \frac{d_L}{\varepsilon_L}, \quad B = \frac{d_{II}}{\varepsilon_{II}} + \frac{d_T}{\varepsilon_T}; \quad (2)$$

$\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;  $d_B, d_L, d_{II}, d_T, \varepsilon_B, \varepsilon_L, \varepsilon_{II}, \varepsilon_T$  – толщина и диэлектрическая проницаемость воздушного зазора, лакокрасочного покрытия, ТПП и теплоизоляции соответственно.

Если дефект меньше электрода ( $D < b$ , рис. 2, б), то математическая модель примет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} C(x) = C_1 + C_2 + C_3, \\ \text{при } x \leq x_0 \quad C_1 = \varepsilon_0 \frac{b^2}{A}, \quad C_2 = 0, \quad C_3 = 0; \\ \text{при } x_0 \leq x \leq x_0 + D \quad C_1 = \varepsilon_0 \frac{b(b-x+x_0)}{A}, \quad C_2 = \varepsilon_0 \frac{b(x-x_0)}{A+B}, \quad C_3 = 0; \\ \text{при } x_0 + D \leq x \leq x_0 + b \quad C_1 = \varepsilon_0 \frac{b(b-x+x_0)}{A}, \quad C_2 = \varepsilon_0 \frac{bD}{A+B}, \quad C_3 = \varepsilon_0 \frac{b(x-x_0-D)}{A}; \\ \text{при } x_0 + b \leq x \leq x_0 + b + D \quad C_1 = 0, \quad C_2 = \varepsilon_0 \frac{b(x-x_0-b)}{A+B}, \quad C_3 = \varepsilon_0 \frac{b(x-x_0-D)}{A}; \\ \text{при } x \geq x_0 + b + D \quad C_1 = 0, \quad C_2 = 0, \quad C_3 = \varepsilon_0 \frac{b^2}{A}. \end{array} \right. \quad (3)$$

Из рис. 2, б видно, что при появлении электрода над дефектом наблюдается уменьшение ёмкости, которая становится минимальной при полном накрытии электродом зоны дефекта.

### Метрологический анализ

Математической основой метрологического анализа является статическая функция преобразования датчика дефекта при перемещении сканирующего электрода – зависимость ёмкости от координаты перемещения  $x$ , координаты дефекта  $x_0$  и конструктивных параметров  $D, b, x_0$ :

$$C = F(x, d, D, b, x_0), \quad (4)$$

где  $d$  – воздушный зазор в датчике;  $D$  – размер дефекта;  $b$  – размер электрода.

Рассмотрим основные погрешности. Будем предполагать, что скорость сканирования настолько мала, что инерционностью измерительного процесса можно пренебречь. Для исследования погрешностей целесообразно пользоваться формулой (1), так как она описывает наиболее общий случай процедуры дефектоскопии. Минимальное значение ёмкости зависит от размера дефекта. Очевидно, что факт обнаружения дефекта можно определить по уменьшению ёмкости на величину наперёд заданного отклонения  $\Delta C$ . Уменьшение ёмкости начинается с того момента, когда электрод правым концом разместился над левой границей дефекта (рис. 2, а). Задавая величину  $\Delta C$ , можно определить факт наступления дефекта.

Таким образом, факт идентификации дефекта определяется следующими соотношениями:

$$C_{\max} - C(x) < \Delta C \text{ – дефекта нет,} \quad (5)$$

$$C_{\max} - C(x) \geq \Delta C \text{ – дефект есть.} \quad (6)$$

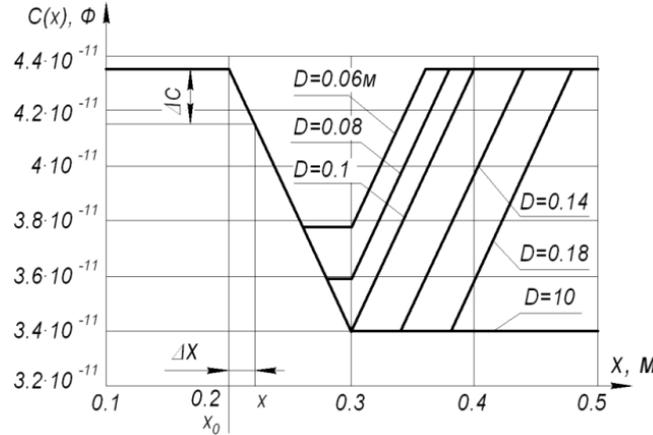


Рис. 3. Иллюстрация к определению погрешности координаты дефекта при  $b=0,1$  м

Из рис. 3 видно, что величина  $\Delta C$  приводит к погрешности  $\Delta x$  определения координаты дефекта, причём чем больше  $\Delta C$ , тем больше  $\Delta x$ .

Погрешность  $\Delta x$  при заданном  $\Delta C$  определится по формуле

$$\Delta C = C_{\max} - \varepsilon_0 b \left( \frac{b - x_0 - \Delta x + x_0}{\frac{d_B}{\varepsilon_B} + \frac{d_L}{\varepsilon_L}} + \frac{(x_0 + \Delta x - x_0)}{\frac{d_B}{\varepsilon_B} + \frac{d_L}{\varepsilon_L} + \frac{d_{II}}{\varepsilon_{II}} + \frac{d_T}{\varepsilon_T}} \right) = \Delta x \varepsilon_0 b \left( \frac{1}{A} + \frac{1}{A+B} \right). \quad (7)$$

При заданном  $\Delta C$  погрешность фиксации координаты дефекта определится по формуле

$$\Delta x = \frac{\Delta C}{\varepsilon_0 b \left( \frac{1}{A} + \frac{1}{A+B} \right)}. \quad (8)$$

Из (8) видно, что при заданной  $\Delta C$ , величине воздушного зазора и толщине слоёв погрешность  $\Delta x$  уменьшается с увеличением ширины  $b$  электрода.

Во избежание ложной идентификации минимальное значение  $\Delta C$  должно быть на порядок больше изменений, связанных с погрешностями датчика зазора и схемы обработки. При изменении воздушного зазора будет изменяться разность между минимальным и максимальным значениями ёмкости. Поэтому порог идентификации дефекта целесообразно привязать к диапазону изменения ёмкости:

$$\Delta x = \frac{\Delta C / \Delta C_0}{\varepsilon_0 b \left( \frac{1}{A} + \frac{1}{A+B} \right)} \Delta C_0, \quad (9)$$

где

$$\Delta C_0 = C_{\max} - C_{\min}, \quad C_{\max} = C_1 = \frac{\varepsilon_0 b^2}{A}, \quad C_{\min} = \frac{\varepsilon_0 b^2}{A+B}. \quad (10)$$

График зависимости погрешности  $\Delta x$  от относительной величины порога обнаружения дефекта  $(\Delta C / \Delta C_0)$  при различных зазорах  $d_g$  показан на рис. 4.

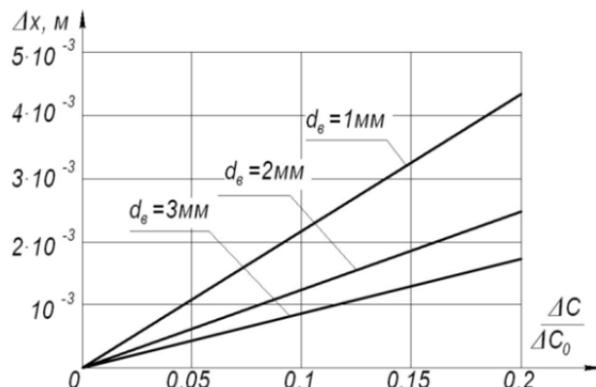


Рис. 4. Зависимость погрешности определения координаты дефекта от величины порога обнаружения при различных воздушных зазорах:  $b = 0,1$  м

Из математической модели (3) следует, что при  $b \geq D$  минимальное значение ёмкости зависит от соотношения размеров дефекта  $D$  и электрода  $b$  согласно выражению

$$C'_{\min} = \varepsilon_0 b \left( \frac{b-D}{A} + \frac{D}{A+B} \right). \quad (11)$$

Если размер электрода больше минимально допустимого дефекта  $D_0$ , то, подбирая порог идентификации дефекта  $\Delta C \approx C'$ , можно автоматически игнорировать мелкие дефекты, размер которых меньше  $D_0$ . Например, пусть  $b = K_3 D_0$ , где  $K_3 > 1,0$  – коэффициент размера электрода. Тогда формула (11) примет вид:

$$C'_{\min} = \varepsilon_0 b D_0 \left( \frac{K_3 - 1}{A} + \frac{1}{A+B} \right). \quad (12)$$

При этом будет иметь место систематическая аддитивная (методическая) погрешность координаты дефекта, определяемая по формуле

$$\Delta_0 = \frac{C'_{\min}}{\varepsilon_0 b \left( \frac{1}{A} + \frac{1}{A+B} \right)}. \quad (13)$$

Формула (13) является базовой для определения требований к конструкционным параметрам устройства. При заданном  $D_0$ , толщинах  $d_T, d_{II}, d_{III}$  и материале слоёв можно найти ширину электрода  $b$  и величину воздушного зазора  $d_B$  такие, при которых  $\Delta_0$  будет иметь допустимое значение. Систематическая погрешность может быть компенсирована конструктивными методами, в частности путём смещения форсунки картриджа на соответствующую величину.

Например, при  $D_0 = 0,1$  м,  $K_3 = 1,1$ ,  $d_B = 2$  мм,  $\Delta_0 \approx 49$  мм. Следовательно, для компенсации данной погрешности необходимо форсунку сместить против направления движения электрода на величину 49 мм.

Значение  $\Delta_0$  зависит от воздушного зазора по формуле, получаемой подстановкой (2) в (13):

$$\Delta_0(d_B) = D_0 \frac{K_{\text{э}}(d_B \varepsilon_{\text{Л}} + d_{\text{Л}} \varepsilon_B + B \varepsilon_B \varepsilon_{\text{Л}}) - B \varepsilon_B \varepsilon_{\text{Л}}}{2(d_B \varepsilon_{\text{Л}} + d_{\text{Л}} \varepsilon_B) + B \varepsilon_B \varepsilon_{\text{Л}}}. \quad (14)$$

Реально величина  $\Delta_0$ , которая легко компенсируется, будет колебаться в пределах, определяемых погрешностью датчика воздушного зазора, по формуле [7]

$$\Delta_{0P} = \Delta_0 + \frac{\partial \Delta_0(d_B)}{\partial d_B} \Delta d_B = \Delta_0 + \frac{D_0 \varepsilon_B \varepsilon_{\text{Л}}^2 B (2 - K_{\text{э}})}{(2d_B \varepsilon_{\text{Л}} + 2d_{\text{Л}} \varepsilon_B + B \varepsilon_B \varepsilon_{\text{Л}})^2} \Delta d_B, \quad (15)$$

где  $\Delta_{0P}$  – реальная величина погрешности определения координаты дефекта с учётом погрешности воздушного зазора;  $d_B$  – абсолютная погрешность датчика зазора.

Формула (15) определяет смещение координаты отметки при наличии погрешности датчика зазора и позволяет определить метрологические требования к датчику зазора, при которых погрешность фиксации дефекта не превысит допустимых значений. Другие виды основных погрешностей, связанные с шумами или квантованием сигнала в цифровых устройствах обработки сигнала, являются несущественными для рассматриваемых устройств дефектоскопического контроля ТПП.

Среди дополнительных погрешностей важнейшей является температурная. Она обусловлена зависимостью электрического сопротивления и диэлектрической проницаемости функциональных слоёв ёмкостного датчика от температуры [8]. Ёмкость конденсаторов при различных температурах определяется температурной зависимостью диэлектрической проницаемости компонентов датчика и изменением его линейных размеров (площади металлических обкладок и ширины воздушного зазора). Зависимость диэлектрической проницаемости воздуха от температуры приведена на рис. 5 [9].

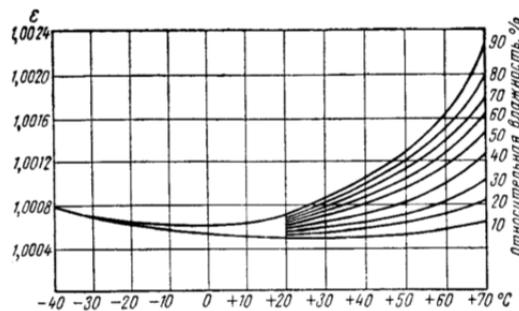


Рис. 5. Зависимость диэлектрической проницаемости воздуха от температуры и влажности

Из рис. 5 видно, что в ожидаемых условиях эксплуатации в закрытых отапливаемых помещениях при температуре воздуха от 5 до 35 °С и относительной влажности не более 80% (при 20°С) диэлектрическая проницаемость воздуха меняется в пределах  $\varepsilon_B = 1,0005-1,0014$ . Анализируя зависимость, указанную на рис. 5, можно сделать вывод, что температурой и влажностью можно пренебречь при условии эксплуатации устройства в закрытых помещениях.

Более существенными являются динамические погрешности, которые определяются инерционностью процессов изменения ёмкости и схем обработки информационных сигналов. Процедура дефектоскопии ТПП предполагает перемещение электрода

(датчика) над поверхностью бака с некоторой скоростью, которая определяет общее время контроля изделия, но ограничена допустимой величиной динамической погрешности, неизбежно возникающей в процессе сканирования.

При увеличении скорости сканирования  $V$  и постоянных времени  $T$  звеньев обработки сигналов уменьшается минимальное значение ёмкости, соответствующее наличию дефекта на поверхности, и смещается координата центра дефекта. Очевидно, что при  $V \rightarrow \infty$  или  $T \rightarrow \infty$  разность между максимальным и минимальным значениями ёмкости стремится к нулю:

$$\Delta C_0 = (C_{\max} - C_{\min}) \rightarrow 0.$$

Рассмотрим методику определения динамической погрешности. При выбранном пороге  $\Delta C$  и каких-то значениях  $V$  и  $T$  возникнет ситуация, когда соотношение (6) не будет выполняться для всех видов дефектов. При этом наиболее сложная ситуация возникает при идентификации дефекта, по размеру близкого к минимальному. Электрод может «проскочить» дефект, и при этом ёмкость не успеет измениться на величину, большую порогового значения  $\Delta C$ . Указанные параметры могут повлиять на результаты дефектоскопии на начальной стадии сканирования, когда дефект находится на краю контролируемого объекта. В этом случае переходный процесс может накладываться на изменения сигнала, связанные с наличием дефекта. Изменение ёмкости при наличии инерционности  $T$  датчика с учётом скорости сканирования можно описать выражениями

$$\begin{aligned} C_V(x) &= C_1 = C_{\max} && \text{при } x < x_0; \\ C_V(x) &= C(x) + [C_{\max} - C(x)] e^{\frac{x_0 - x}{VT}} && \text{при } x_0 \leq x \leq x_0 + b; \\ C_V(x) &= C_V(x_0 + b) = C_{\min} && \text{при } x_0 + b \leq x \leq x_0 + D; \\ C_V(x) &= C(x) + [C_{\min} - C(x)] e^{\frac{x_0 + D - x}{VT}} && \text{при } x_0 + D \leq x \leq x_0 + D + b; \\ C_V(x) &= C(x) + [C(x_0 + b) - C(x)] e^{\frac{x_0 + D - x}{VT}} && \text{при } x \geq x_0 + D + b, \end{aligned}$$

где  $C(x) = \frac{b^2}{\frac{d_{\epsilon} + d_{\delta}}{\epsilon_{\epsilon} \epsilon_{\delta}}}$ .

При выбранном пороге срабатывания  $\Delta C$  динамическую погрешность  $\Delta x_D$  можно найти из уравнения  $C_V(x + \Delta x_D) = C(x)$ , которое после алгебраических преобразований сводится к виду:

$$b\epsilon_0 \left[ \frac{b}{A} + \frac{x_0 - x - \Delta x_D}{A + B} \left( 1 - e^{\frac{x_0 - x - \Delta x_D}{VT}} \right) \right] = b\epsilon_0 \left( \frac{b}{A} + \frac{x_0 - x}{A + B} \right). \quad (16)$$

В результате преобразования (16) можно определить предельную скорость сканирования аналитически:

$$V = \frac{x_0 - x_{II} - \Delta x_D}{T \ln \left[ 1 - \frac{(x_0 - x_{II})}{(x_0 - x_{II} - \Delta x_D)} \right]}. \quad (17)$$

При этом величина  $x_{II}$  определяется по заданному порогу срабатывания  $\Delta C$  из соотношения:

$$b\varepsilon_0 \frac{x_{II} - x_0}{A + B} = \Delta C, \quad (18)$$

где  $x_{II}$  – координата порога срабатывания при отсутствии инерционности.

Из (18) следует

$$x_{II} = x_0 + \frac{\Delta C (A + B)}{b\varepsilon_0}. \quad (19)$$

После подстановки (19) в (17) получим:

$$V = \frac{\Delta C (A + B) - b\varepsilon_0 \Delta x_D}{b\varepsilon_0 T \ln \left[ 1 - \frac{\Delta C (A + B)}{\Delta C (A + B) - b\varepsilon_0 \Delta x_D} \right]}. \quad (20)$$

Формулы (16)-(20) справедливы при  $x_0 < x < x_0 + b$ . Формула (17) связывает предельную скорость сканирования, допустимую динамическую погрешность и все главные конструкционные параметры датчика. По заданной погрешности  $\Delta x$  и постоянной времени  $T$  можно найти предельную скорость сканирования при известных конструкционных параметрах.

Для выявления основных способов повышения точности и стабильности рассмотрим сводную табл. 1 абсолютных значений различных видов погрешностей.

Таблица 1. Сводная таблица погрешностей

№	Причина погрешности	Обозначение	Предельные значения	Примечание
1	Порог обнаружения	$\Delta_C$	1,0-4,0 мм	при $b = 0,1$ м
2	Датчик воздушного зазора	$\Delta_B$	0,2-0,8 мм	Датчик зазора с погрешностью $\pm 0,1$ мм
3	Температура	$\Delta_\theta$	0-0,7 мм	В диапазоне температур $\theta = 10-40$ °С
4	Скорость сканирования (динамика)	$\Delta_D$	1,0-5,0 мм	В диапазоне скоростей $V = 0,05-0,2$ м/с

Суммарная погрешность всей системы определится по формуле

$$\Delta_\Sigma = \sqrt{\Delta_C^2 + \Delta_B^2 + \Delta_\theta^2 + \Delta_D^2}. \quad (21)$$

Расчёт показал, что значение погрешности колеблется в промежутке от 1,48 мм до 6,5 мм. Полученные числовые значения погрешностей являются предельными, так как определены для самых неблагоприятных случаев, когда все виды погрешностей имеют один знак и имеют максимальные значения.

Все составляющие погрешностей соизмеримы. Наибольший вес имеют динамическая погрешность  $\Delta_d$  и погрешность, вызванная порогом срабатывания  $\Delta_c$ , величина которого не может быть маленькой, так как она должна предусматривать возможность игнорирования малых дефектов. Погрешность  $\Delta_c$  носит систематический характер и может быть скомпенсирована конструкционным методом путём смещения форсунки относительно ёмкостного датчика против направления движения на величину, определяемую (13). Во избежание удваивания погрешности при проходе датчика в обратном направлении необходимо размещать на подвижной платформе две форсунки, симметрично смещённые от границ ёмкостного датчика.

Поскольку компенсация динамической погрешности не может быть проведена конструкционным или алгоритмическим путём, необходимо находить компромисс между производительностью установки и погрешностью фиксации координаты дефекта. Выбор между скоростью сканирования и допустимой погрешностью определяется согласно (20).

### **Выводы**

Из проведённого метрологического анализа устройства неразрушающего контроля токопроводящих покрытий топливных баков летательных аппаратов можно сделать вывод, что суммарная погрешность состоит из методической и динамической погрешностей.

Методическая погрешность локализации дефектов складывается из погрешности, вызванной порогом обнаружения, заданным максимальным размером игнорируемого дефекта, датчиком воздушного зазора и изменением температуры.

Динамическая погрешность зависит от конструктивных параметров устройства и определяется скоростью сканирования и инерционностью датчиков и схем обработки сигналов. Скорость сканирования выбирается на основе компромисса между производительностью установки и допустимой погрешностью локализации дефекта.

Метрологический анализ показал возможность создания устройства, позволяющего фиксировать границы дефекта с погрешностью, не превышающей  $\Delta_{\Sigma} = 6,5$  мм, что при средней длине топливного бака в 10 м составляет 0,65 %.

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

### **Библиографический список**

1. Блинов В.Н., Иванов Н.Н., Сеченов Ю.Н., Шалай В.В. Ракеты-носители. Проекты и реальность: справочное пособие в 2 кн. Кн. 1. Ракеты-носители России и Украины. Омск: Омский государственный технический университет, 2011. 380 с.
2. ГОСТ 19005-81 Средства обеспечения защиты изделий ракетной и ракетно-космической техники от статического электричества. Общие требования к металлизации и заземлению. М.: Издательство стандартов, 1981. 38 с.
3. Овчаренко А.Г., Раско С.Л. Электростатическая безопасность пожаро- и взрывоопасных производств. Бийск: Алтайский государственный технический университет, 2006. 155 с.
4. Скворцов Б.В., Самсонов А.С., Блинов Д.И., Ильмурина С.Ф., Самсонов С.А. Проблемы дефектоскопического контроля токопроводящего покрытия топливных баков летательных аппаратов // Известия Самарского научного центра РАН. 2016. Т. 18, № 1. С. 114-118.

5. Федосенко Ю.К., Герасимов В.Г., Покровский А.Д., Останин Ю.Я. Неразрушающий контроль. Справочник Т. 2. Кн. 2. Вихретоковый контроль. М.: Машиностроение, 2006. 688 с.
6. Скворцов Б.В., Самсонов А.С., Блинов Д.И. Устройство контроля целостности токопроводящего покрытия на диэлектрическом материале: патент РФ № 159780; опубл. 20.02.2016; бюл. № 5.
7. Нефёдов В.И. Метрология и радиоизмерения. М.: Высшая школа, 2006. 526 с.
8. Кучинский Г.С., Назаров Н.И. Силовые электрические конденсаторы. М.: Энергоатомиздат, 1992. 320 с.
9. Фролов А.Д. Теоретические основы конструирования и надёжности радиоэлектронной аппаратуры. М.: Высшая школа, 1970. 485 с.

## METROLOGICAL ANALYSIS OF A DEVICE ROF NONDESTRUCTIVE CONTROL OF FLIGHT VEHICLE FUEL TANK CURRENT CONDUCTIVE COATINGS

© 2017

- A. S. Samsonov** Doctor of Science (Engineering), leading design engineer;  
Joint Stock Company Space Rocket Centre Progress, Samara, Russian Federation;  
[mail@samspace.ru](mailto:mail@samspace.ru)
- D. I. Blinov** Doctor of Science (Engineering), design engineer;  
Joint Stock Company Space Rocket Centre Progress, Samara, Russian Federation;  
[mail@samspace.ru](mailto:mail@samspace.ru)
- B. V. Skvortsov** Doctor of Science (Engineering), Professor, Department of Electrical Engineering;  
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;  
[aps@ssau.ru](mailto:aps@ssau.ru)
- D. M. Zhivonosnovskaya** postgraduate student, Department of Electrical Engineering;  
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;  
[aps@ssau.ru](mailto:aps@ssau.ru)

The article discusses and theoretically justifies a method and a device for non-destructive testing of conductive coatings of aircraft fuel tanks. The authors present a patented solution and display the essence of the measuring procedure that consists in scanning the surface by an electrode forming a capacitor with the test material. A mathematical model describes the process of detecting a closed defect with different sizes of the scanning electrode. The article contains metrological analysis of the developed device, considering the basic and additional errors that affect the results of the measurement procedure. By basic errors, in this paper, we mean the error in determining the coordinate of the defect and the systematic additive (methodological) error; by additional errors we understand thermal and dynamic ones. Among all types of errors that arise in the process of flaw detection, the most significant ones are identified. Also, methods for compensating various types of errors by constructive or algorithmic methods are proposed. Numerical analysis of the errors considered in the article is carried out. The analysis proves the possibility of defect localization with an error  $\leq 6.5$  mm. A summary table of the main types of errors is compiled.

*Aircraft; fuel tank; conductive coating; defects; control; capacitance method; sensor design.*

---

*Citation:* Samsonov A.S., Blinov D.I., Skvortsov B.V., Zhivonosnovskaya D.M. Metrological analysis of a device rof nondestructive control of flight vehicle fuel tank current conductive coatings. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2017. V. 16, no. 3. P. 197-208. DOI: 10.18287/2541-7533-2017-16-3-197-208

## References

1. Blinov V.N., Ivanov N.N., Sechenov Yu.N., Shalay V.V. *Rakety-nositeli. Proekty i real'nost': spravochnoe posobie v 2 kn. Kn. 1. Rakety-nositeli Rossii i Ukrainy* [Carrier rockets. Projects and reality: reference book in 2 books, book 1: Carrier rockets of Russia and Ukraine]. Omsk: Omsk State Technical University Publ., 2011. 380 p.
2. GOST 19005-81. The means of the provision of the rocket and rocket-space technology items protection from the static electricity. General requirements for the metallization and earthing. Moscow: Izdatel'stvo Standartov Publ., 1981. 38 p. (In Russ.)
3. Ovcharenko A.G., Rasko S.L. *Elektrostaticheskaya bezopasnost' pozharo- i vzryvoopasnykh proizvodstv* [Electrostatic safety of fire- and explosion-hazardous manufactures]. Biysk: Altai State Technical University Publ., 2006. 156 p.
4. Skvortsov B.V., Samsonov A.S., Blinov D.I., Ilmurzina S.F., Samsonov S.A. The problems of flaw detection control of conductive coating of the fuel tanks of aircraft. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2016. V. 18, no. 1. P. 114-118. (In Russ.)
5. Fedosenko Yu.K., Gerasimov V.G., Pokrovskiy A.D., Ostanin Yu.Ya. *Nerazrushayushchiy kontrol'. Spravochnik T. 2. Kn. 2. Vikhretokovyy kontrol'* [Non-destructive testing. Reference book. Volume 1. Book 2. Eddy current control]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2006. 688 p.
6. Skvortsov B.V., Samsonov A.S., Blinov D.I. *Ustroystvo kontrolya tselostnosti tokoprovodyashchego pokrytiya na dielektricheskom materiale* [Device for controlling the integrity of a conductive coating on a dielectric material]. Patent RF, no. 159780, 2016. (Publ. 20.02.2016, bull. no. 5).
7. Nefedov V.I. *Metrologiya i radioizmereniya* [Metrology and radio measurements]. Moscow: Vysshaya Shkola Publ., 2006. 526 p.
8. Kuchinskiy G.S., Nazarov N.I. *Silovye elektricheskie kondensatory* [Power electric capacitors]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1992. 320 p.
9. Frolov A.D. *Teoreticheskie osnovy konstruirovaniya i nadezhnosti radioelektronnoy apparatury* [Theoretical basics of radio electronic equipment designing and reliability: Book for high schools (radio engineering specialty)]. Moscow: Vysshaya Shkola Publ., 1970. 485 p.