

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В ТОНКОЙ ПРОВОДЯЩЕЙ ПЛЕНКЕ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОИМПЕДАНСНОЙ ТОМОГРАФИИ ПРИ НЕПОЛНОМ ПЕРЕБОРЕ КОМБИНАЦИЙ ТОКОВЫХ ЭЛЕКТРОДОВ

Е.А. Рындин, А.С. Исаева

Предложен метод количественной оценки эффективности электроимпедансной томографии в процессе определения дефектов в тонкой проводящей пленке при неполном переборе токовых контактов, позволяющий обоснованно оптимизировать соотношение между точностью регистрации дефектов и объемом требуемых вычислений. Приведены результаты вычислительных экспериментов, позволяющие оценить его эффективность.

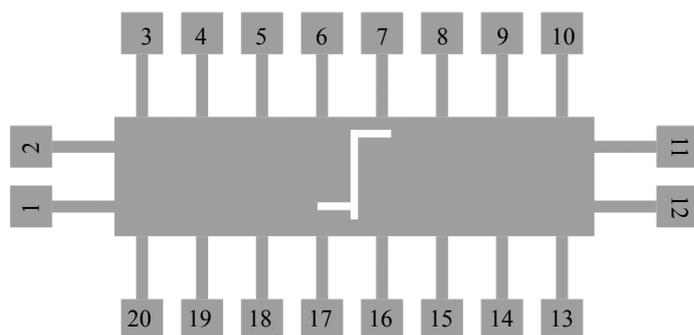
*Ключевые слова:* дефектоскопия, электроимпедансная томография.

Электроимпедансная томография (ЭИТ) — это метод реконструкции распределения электропроводимости на поверхности и внутри объектов, разработанный изначально как метод медицинской визуализации, позволяющий реконструировать двух- и трехмерные распределения характеристик тканей тела [1]. Наряду с разработкой систем контроля сложных объектов, базирующихся на других физических принципах [2, 3], в настоящее время ведутся активные исследования с целью применения ЭИТ для разработки систем регистрации дефектов на поверхностях технических объектов. Например, в [4, 5] регистрацию и мониторинг дефектов в концентраторах механических напряжений крыла самолета в процессе полета предложено осуществлять методом ЭИТ, используя в качестве сенсора тонкую проводящую пленку, связанную с участком поверхности крыла и электрически изолированную от нее пленкой полиимида.

Используя метод ЭИТ, можно получить распределение любого физического параметра, на который способна реагировать пленка. При современном уровне развития технологии создание полимерных пленок с заданными механическими свойствами и изменяющейся проводимостью под воздействием света, температуры, кислот или щелочей, воды и т.д. не представляет собой неразрешимой задачи [7, 8].

Активно исследуются полимерные композитные пленки с углеродными нанотрубками, которые могут быть использованы при разработке сенсора дефектов. В открытой печати есть работы, рассматривающие подобные сенсоры [7—16]. Технология получения таких пленок, а также методика измерений описаны в [8, 12]. Одной из особенностей полимерных композитных пленок с углеродными нанотрубками является их способность реагировать изменением проводимости не только на механические повреждения, но и на механические напряжения, возникающие в ней при эластических и пластических деформациях [11].

На рис. 1 схематически показан пример прямоугольной конфигурации проводящей пленки с дефектом и контактами 1 — 20 по периметру. В рамках метода электроимпедансной томографии через одну пару контактов, называемых токовыми, пропускается фиксированный электрический ток  $I_C$ , а на остальных контактах измеряются уровни потенциалов. Результаты измерений сохраняются в памяти бортового компьютера.



Данные операции повторяются для каждой новой пары токовых контактов, после чего решаются прямая и обратная задачи. Прямая задача заключается в расчете потенциалов на электродах для заданного распределения удельной проводимости посредством численного решения уравнения Лапласа [1].

Рис. 1. Конфигурация тонкой проводящей пленки с дефектом и контактами 1 — 20.

Рындин Евгений Адальбертович, доктор техн. наук, профессор кафедры «Конструирование электронных средств» Института нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета (г. Таганрог). Тел. +7 (8634) 361374. E-mail: earyndin@sfnedu.ru

Исаева Алина Сергеевна, канд. техн. наук, научный сотрудник кафедры «Конструирование электронных средств» Института нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета (г. Таганрог). Тел. +7 (8634) 361374. E-mail: isaevaas@sfnedu.ru

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \sigma \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \sigma \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) = 0 \quad (1)$$

с граничными условиями:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = \pm \frac{I_c}{Ld\sigma(x, y)}, \text{ на границах с токовыми контактами;} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = 0, \text{ на остальных участках границ,} \quad (3)$$

где  $\sigma$  — удельная проводимость тонкой пленки;  $x, y$  — координаты;  $\varphi$  — электрический потенциал;  $I_c$  — сила тока;  $S$  — площадь контакта;  $L$  — ширина контакта;  $d$  — толщина пленки.

Реконструкция изображений ЭИТ осуществляется в результате численного решения методом Ньютона обратной задачи, состоящей в расчете распределения удельной проводимости тонкой пленки для определенных потенциалов на контактах [1]:

$$\delta\sigma_k = J(\sigma_{k-1})^{-1} [v(\sigma_{k-1}) - v_0]; \quad (4)$$

$$\sigma_k = \sigma_{k-1} + \delta\sigma_k, \quad (5)$$

где  $\sigma_k$  — матрица значений удельной проводимости для  $k$ -й итерации метода Ньютона;  $\delta\sigma_k$  — матрица вариаций проводимости для  $k$ -й итерации;  $v_0$  — вектор измеренных потенциалов на контактах;  $v(\sigma_{k-1})$  — вычисленные потенциалы на контактах для  $(k-1)$ -й итерации;  $J(\sigma_{k-1})^{-1}$  — псевдообращенная матрица Якоби. Численное решение прямой и обратной задач ЭИТ выполняется на двухмерной координатной сетке  $G = \{(x_i, y_j) \mid i = 1, 2, \dots, I, j = 1, 2, \dots, J\}$ , где  $I, J$  — число элементов сетки по координатам  $x$  и  $y$  соответственно.

Точность реконструкции координат дефектов в тонкой проводящей пленке методом ЭИТ определяется числом контактов по периметру пленки, их размерами, шагом координатной сетки, а также числом реализованных комбинаций токовых контактов. При мониторинге дефектов крыла самолета в процессе полета, то есть в реальном масштабе времени, необходимо найти баланс между быстродействием системы мониторинга, определяемым параметрами координатной сетки и производительностью бортового компьютера, осуществляющего вычислительные операции численного решения прямой и обратной задач ЭИТ, и точностью реконструкции дефекта. В данном случае под точностью понимается степень соответствия реконструированного бортовым компьютером пространственного распределения удельной проводимости сенсорной пленки («изображения дефекта») реальному распределению удельной проводимости (фактическому дефекту). В медицине ЭИТ, как правило, является экспресс-методом, уступающим в точности, например, магниторезонансной томографии [1]. Авторам видится похожее применение в сфере неразрушающего контроля: определение наличия дефекта и места его расположения, за которым, в случае необходимости, могут последовать уточняющие процедуры с использованием других методов. Плюсы использования ЭИТ в качестве метода постоянного мониторинга очевидны: не требуются громоздкое оборудование, демонтаж деталей конструкции, источник высокого напряжения [4].

С целью обоснованной оптимизации соотношения между точностью регистрации дефектов и объемом требуемых вычислений разработаны метод и программные средства количественной оценки эффективности ЭИТ при неполном переборе токовых контактов. В рамках данного метода вводится показатель эффективности  $h$ , выражаемый в процентах и определяемый двумя сомножителями:  $h = 100 \times h_1 \times h_2$ , где сомножитель  $h_1$  характеризует появление изображения дефекта в области фактического дефекта, а сомножитель  $h_2$  — появление изображений дефектов в фактически бездефектных областях.

Важно учесть возможность ситуаций, при которых изображение дефекта будет незначительно смещено по координатам относительно фактического расположения дефекта. В этом случае показатель эффективности может быть необоснованно низким, несмотря на то, что дефект определен удовлетворительно. С целью решения данной проблемы сомножитель  $h_1$  представлен в виде двух слагаемых, характеризующих появление изображения дефекта в области дефекта ( $h_{11}$ ) и в некоторой окрестности дефекта ( $h_{12}$ ), размер которой, выраженный в шагах координатной сетки, будем далее называть апертурой. Компоненты  $h_{11}$  и  $h_{12}$  суммируются с некоторыми весовыми коэффициентами, дающими в сумме единицу:

$$h = 100 (h_{11}\xi_1 + h_{12}\xi_2) h_2; \quad (6)$$

$$\xi_1 + \xi_2 = 1, \quad (7)$$

где  $\xi_1, \xi_2$  — весовые коэффициенты.

Каждая из составляющих показателя эффективности в выражении (6) представляет собой усредненную разницу между реконструированными и фактическими значениями удельной проводимости пленки, выраженную в относительных единицах, причем  $h_{12}$  и  $h_2$  предполагают усреднение по заданной апертуре. Пользователь может определять допустимость смещения изображения дефекта в пределах апертуры путем подбора весовых коэффициентов  $\xi_1, \xi_2$ , а величину допустимого смещения — значением апертуры.

Показатель  $h_{11}$  определяется выраженной в относительных единицах усредненной по области дефекта разностью между реконструированными и фактическими значениями удельной проводимости пленки в зоне дефекта в соответствии с выражением

$$h_{11} = 1 - \frac{\sum_{i=i_d \min}^{i_d \max} \sum_{j=j_d \min}^{j_d \max} \frac{|\sigma_{i,j}^{idef} - \sigma_{i,j}^{def}|}{\sigma_{i,j}^{id}}}{(i_d \max - i_d \min)(j_d \max - j_d \min)}, \quad (8)$$

где  $i, j$  — индексы элементов двумерной координатной сетки;  $i_{d \min}, j_{d \min}$  — минимальные индексы дефектных элементов по координатам  $x$  и  $y$  соответственно;  $i_{d \max}, j_{d \max}$  — максимальные индексы дефектных элементов по координатам  $x$  и  $y$ ;  $\sigma_{i,j}^{idef}$  — реконструированная удельная проводимость  $(i, j)$ -элемента пленки;  $\sigma_{i,j}^{def}$  — фактическая удельная проводимость  $(i, j)$ -элемента пленки;  $\sigma_{i,j}^{id}$  — удельная проводимость  $(i, j)$ -элемента бездефектной пленки.

Показатель  $h_{12}$  определяется выраженной в относительных единицах усредненной по области дефекта разностью между средними по апертуре реконструированными и фактическими значениями удельной проводимости пленки в зоне дефекта:

$$h_{12} = 1 - \frac{\sum_{i=i_d \min}^{i_d \max} \sum_{j=j_d \min}^{j_d \max} \frac{|\sigma_{i,j}^{aidef} - \sigma_{i,j}^{adef}|}{\sigma_{i,j}^{id}}}{(i_d \max - i_d \min)(j_d \max - j_d \min)}; \quad (9)$$

$$\sigma_{i,j}^{aidef} = \frac{\sum_{k=i-i_A}^{i+i_A} \sum_{m=j-j_A}^{j+j_A} \sigma_{k,m}^{idef}}{(2i_A+1)(2j_A+1)}; \quad \sigma_{i,j}^{adef} = \frac{\sum_{k=i-i_A}^{i+i_A} \sum_{m=j-j_A}^{j+j_A} \sigma_{k,m}^{def}}{(2i_A+1)(2j_A+1)}, \quad (10)$$

где  $i_A, j_A$  — полуапертуры по строкам и столбцам матрицы удельной проводимости пленки соответственно;  $\sigma_{i,j}^{aidef}$  — средняя по апертуре реконструированная удельная проводимость  $(i, j)$ -элемента пленки в области дефекта;  $\sigma_{i,j}^{adef}$  — средняя по апертуре фактическая удельная проводимость  $(i, j)$ -элемента пленки;  $\sigma_{k,m}^{idef}$  — реконструированная удельная проводимость элемента пленки с индексами  $k, m$ ;  $\sigma_{k,m}^{def}$  — фактическая удельная проводимость элемента пленки с индексами  $k, m$ .

Показатель  $h_2$  выражает в относительных единицах усредненную разность между средними по апертуре реконструированными и фактическими значениями удельной проводимости пленки вне зоны дефекта в соответствии с выражениями:

$$h_2 = 1 - \frac{1}{N} \sum_{\substack{i < i_d \min \\ i > i_d \max}} \sum_{\substack{j < j_d \min \\ j > j_d \max}} \frac{|\sigma_{i,j}^{aind} - \sigma_{i,j}^{and}|}{\sigma_{i,j}^{id}}, \quad (11)$$

$$\sigma_{i,j}^{aind} = \frac{\sum_{k=i-i_A}^{i+i_A} \sum_{m=j-j_A}^{j+j_A} \sigma_{k,m}^{ind}}{(2i_A+1)(2j_A+1)}; \quad \sigma_{i,j}^{and} = \frac{\sum_{k=i-i_A}^{i+i_A} \sum_{m=j-j_A}^{j+j_A} \sigma_{k,m}^{nd}}{(2i_A+1)(2j_A+1)}, \quad (12)$$

где  $N$  — общее число анализируемых единичных элементов бездефектной области;  $\sigma_{ij}^{and}$  — средняя по апертуре реконструированная удельная проводимость  $(i, j)$ -элемента бездефектной области пленки;  $\sigma_{ij}^{and}$  — средняя по апертуре фактическая удельная проводимость  $(i, j)$ -элемента бездефектной области пленки;  $\sigma_{k,m}^{ind}$  — реконструированная удельная проводимость элемента пленки с индексами  $k, m$ ;  $\sigma_{k,m}^{nd}$  — фактическая удельная проводимость элемента пленки с индексами  $k, m$ .

На основе выражений (1) — (12) разработан пакет прикладных программ для количественной оценки эффективности электроимпедансной томографии при неполном переборе токовых контактов [6], использующий предложенный в [4] метод повышения эффективности ЭИТ, заключающийся в отборе из реконструированных распределений удельной проводимости пленки, полученных для различных комбинаций токовых контактов, элементов с минимальными значениями удельной проводимости, формировании из этих элементов промежуточного распределения удельной проводимости и последующей его обработке с использованием методов высокочастотной и/или низкочастотной цифровой фильтрации изображений (удельная проводимость пленки интерпретируется как «яркость изображения»).

Результаты вычислительных экспериментов, проведенных с использованием разработанных программных средств [6], получены для проводящей пленки площадью  $2 \times 8$  см<sup>2</sup> с 20 контактами по периметру и с дефектом сложной формы, площадь которого составляла 4 % от площади пленки (см. рис. 1). Проводимость в области дефекта составляла 10 % от проводимости бездефектных областей. Учитывалась неидеальность пленки посредством введения случайных флуктуаций удельной проводимости, характеризующихся нормальным законом распределения со стандартным отклонением 0,05.

Полученные результаты показывают, что для одной произвольно выбранной конфигурации токовых контактов показатель эффективности ЭИТ варьируется в пределах 5,8 — 43,8 % (математическое ожидание 30,1 %) в зависимости от взаимного расположения токовых электродов и дефекта, которое в реальной ситуации предсказать, разумеется, невозможно. При увеличении числа реализованных конфигураций токовых контактов до 10 показатель эффективности возрастает до 37,2 — 51,3 % (математическое ожидание 41,7 %). При числе реализованных конфигураций токовых контактов 90 показатель эффективности составляет 52,1 — 52,7 % (математическое ожидание 52,4 %). Общее число возможных конфигураций токовых электродов в рассматриваемом случае составляет 288. Таким образом, с увеличением числа конфигураций токовых контактов математическое ожидание показателя эффективности увеличивается (с 30,1 для одной конфигурации до 52,4 % для 90 конфигураций), а разброс значений уменьшается (с 21,8 для одной конфигурации до 0,6 % для 90 конфигураций).

Допустимое значение показателя эффективности ЭИТ определяется конкретной конфигурацией сенсорной пленки и требованиями, предъявляемыми к точности и быстродействию системы мониторинга дефектов. В качестве примера на рис. 2 схематически представлены пространственное распределение удельной проводимости пленки с дефектом и реконструированное распределение удельной проводимости, полученное на пленке, представленной на рис. 1, для 90 конфигураций

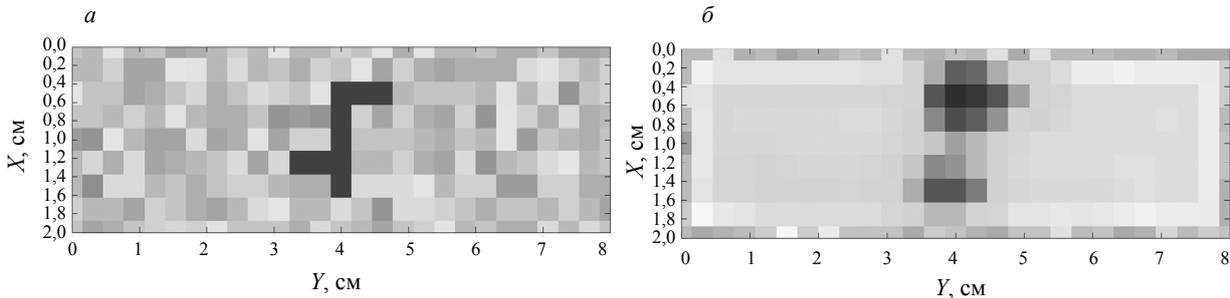


Рис. 2. Схематическое представление удельной проводимости пленки с дефектом (а) и реконструированное распределение удельной проводимости (б), полученное для 90 конфигураций токовых контактов.

токовых контактов. Для визуализации задано соответствие между значением удельной проводимости элемента пленки и яркостью этого элемента на рис. 2. Показатель эффективности  $h = 52,4$  %, что в рассматриваемом случае можно считать достаточным, поскольку о наличии и расположении дефекта по результатам реконструкции можно судить однозначно.

Таким образом, предложенный метод и разработанные программные средства количественной оценки эффективности электроимпедансной томографии в процессе определения дефектов в тон-

кой проводящей пленке при неполном переборе токовых контактов позволяют обоснованно оптимизировать соотношение между точностью регистрации дефектов и объемом требуемых вычислений. Необходимое число реализуемых конфигураций токовых электродов определяется параметрами сенсорной пленки, числом граничных контактов и требуемой точностью определения дефектов.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Нанотехнологии» Института нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета (г. Таганрог) при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект 213.01–11/2014–12) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант 16-07-00018).

Институт нанотехнологий,  
электроники и приборостроения  
Южного федерального университета  
г. Таганрог

Поступила в редакцию  
25 августа 2016 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пеккер Я.С., Бразовский К.С., Усов В.Ю., Плотников М.П., Уманский О.С. Электроимпедансная томография. — Томск: Изд-во НТЛ, 2004. — 298 с.
2. Vavilov V.P., Guo Sin'yan', Shiryayev V.V., Nesteruk D.A. Thermal Control of Corrosion in Aluminum Panels of Airplanes. — Russian Journal of Nondestructive Testing, 2008, v. 44, No. 4, p 266—273.
3. Steblev Y.I., Susarev S.V., Bykov D.E. The Principles of Designing Automated Systems for Diagnostic Monitoring of the Engineering Structures of Hazardous Production Objects. — Russian Journal of Nondestructive Testing, 2015, v. 51, No. 4, p 185—197.
4. Рындин Е.А., Исаева А.С. Метод анализа дефектов поверхности конструкций с использованием электроимпедансной томографии. — Вестник Южного научного центра РАН, 2013, т. 9, с. 17 — 21.
5. Ryndin E.A., Isaeva A.S. The sensor of surface defects based on electrical impedance tomography technique. — International Conference on Micro- and Nano-Electronics. — Proc. of SPIE, 2014, v. 9440, p. 94400V-1—94400V-6.
6. Рындин Е.А., Исаева А.С. Программа моделирования дефектов в тонкой проводящей пленке. — Свид-во РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013618156, 2013.
7. Tsung-Chin Hou, Kenneth J. Loh, Lynch Jerome P. Electrical impedance tomography of carbon nanotube composite materials. — Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems, 2007.
8. Hou T., Loh K.J., Lynch J.P. Spatial conductivity mapping of carbon nanotube composite thin films by electrical impedance tomography for sensing applications. — Nanotechnology, 2007, 18. — 315501 p.
9. Loh K.J., Kim J., Lynch J.P., Kam N.W.S. and Kotov N.A. Multifunctional Layer-by-Layer Carbon Nanotube-Polyelectrolyte Thin Films for Strain and Corrosion Sensing. — Smart Materials and Structures, 2007, v. 16(2), p. 429—438.
10. Kenneth J. Loh, Tsung-Chin Hou, Lynch Jerome P., Kotov Nicholas A. Carbon Nanotube Sensing Skins for Spatial Strain and Impact Damage Identification. — J. Nondestruct Eval., 2009, v. 28, p. 9—25.
11. Kenneth J. Loh, Tsung-Chin Hou, Lynch Jerome P., Kotov Nicholas A., Loh K.J. Nanotube-based Sensing Skins for Crack Detection and Impact Monitoring of Structures. — Proceedings of the 6th International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford, CA, 2007, p. 11—13.
12. Dharap P., Li Z., Nagarajaiah S. and Barrera E.V. Nanotube Film Based on Single-Wall Carbon Nanotubes for Strain Sensing. — Nanotechnology, 2004, v. 15(3), p. 379—382.
13. Kang I., Schulz M., Kim J.H., Shanov V. and Shi D. A Carbon Nanotube Strain Sensor for Structural Health Monitoring. — Smart Materials and Structures, 2006, v. 15(3), p. 737—748.
14. Loh K.J., Kim J., Lynch J.P., Kam N.W.S. and Kotov N.A. Multifunctional Layer-by-Layer Carbon Nanotube- Polyelectrolyte Thin Films for Strain and Corrosion Sensing. — Smart Materials and Structures, 2007, v. 16, p. 429—438.
15. Loh K.J., Lynch J.P., Kotov N.A. Mechanical-Electrical Characterization of Carbon Nanotube Thin Films for Structural Monitoring Applications. — Proceedings of SPIE – Smart Structures and Materials, v. 6174, p. 61741Z — 617412Z.
16. Seppänen A., Hallaji M., Pour-Ghaz M. Electrical impedance tomography-based sensing skin for detection of damage in concrete. — 1th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014), October 6—10, 2014, Prague, Czech Republic.