

## Система обнаружения поверхностных дефектов в материалах инженерных конструкций

*А.С. Исаева, М.А. Денисенко*

*Инжиниринговый центр приборостроения, радио- и микроэлектроники  
Южного федерального университета, г. Таганрог*

**Аннотация:** В статье приводится методика реализации, структура и функциональная схема системы обнаружения поверхностных дефектов на основе метода электроимпедансной томографии в материалах инженерных конструкций, подвергающихся в процессе эксплуатации значительным нагрузкам. Рассмотрено устройство управления системой сбора/подачи напряжений на граничные электроды чувствительного элемента и описан алгоритм его работы. Предложен способ реализации и представлены результаты моделирования этой системы.

**Ключевые слова:** мониторинг дефектов, неразрушающий контроль, электроимпедансная томография, моделирование, чувствительный элемент, функциональная схема.

### Введение

Отслеживание состояния подвижных и неподвижных объектов – одна из важнейших комплексных задач инженерной науки [1, 2]. Проектирование и разработка систем мониторинга состояния конструкций, в том числе систем неразрушающего контроля дефектов и разрушения элементов, является актуальной областью инженерной и научной деятельности, которая включает в себя как поиск решений прикладных конструкторских и технологических задач, так и учет особенностей физических процессов, протекающих в глубине и на поверхности исследуемых материалов конструкций [3, 4]. Своевременное получение информации о появлении механических повреждений объектов и конструкций в ходе эксплуатации позволяет уменьшить денежные и временные затраты на их обслуживание и ремонт.

В статье описывается система, основанная на пленочных сенсорных элементах. Отличительной особенностью предлагаемой системы является в первую очередь проведение мониторинга "в режиме онлайн", то есть без выведения конструкции из эксплуатации, а также: относительная простота изготовления; потенциально широкие возможности по сопряжению данной

системы с уже имеющимися электронно-вычислительными ресурсами, что может быть актуально, например, для применения в авиации; широкие возможности масштабирования системы, в том числе возможность резервирования. Отслеживание возникновения дефектов основывается на методе электроимпедансной томографии (далее ЭИТ) [5].

### **Методика реализации системы мониторинга поверхностных дефектов**

Способ реализации системы мониторинга поверхностных дефектов элементов конструкций может быть основан на следующей методике:

- на исследуемый элемент наносится тонкая проводящая пленка (или композиция диэлектрических и проводящих слоев пленок, в зависимости от типа основания);

- при этом по периметру границ пленки расположены проводящие электроды, скоммутированные с системой обработки данных, пленка с электродами является чувствительным элементом (ЧЭ);

- применение ЭИТ позволяет получить распределение проводимости в проводящей пленке на основе значений напряжений на электродах;

- в случае возникновения дефектов и/или механических напряжений в области, расположенной под пленкой, в ЧЭ меняется распределение проводимости.

- точность распознавания дефектов в пленке методом ЭИТ зависит от числа контактов по ее периметру, их размеров и качества, шага координатной сетки, а также количества обрабатываемых комбинаций токовых контактов.

Преимущество метода ЭИТ состоит в том, что данные о поверхностных дефектах возможно получить без использования громоздкого оборудования, что в перспективе позволит добиться полной автоматизации процесса контроля и проведения контроля в режиме эксплуатации [6, 7]. Также к преимуществам можно отнести следующее: гибкая подстройка

---

системы к требованиям по покрытию необходимой площади и разрешающей способности; интуитивно понятные выходные данные – визуализация распределения дефектов; легкость монтажа и демонтажа системы [8].

### **Алгоритм работы системы сбора/подачи напряжений на граничные электроды чувствительного элемента**

Начальные условия таковы: имеется исследуемый образец, представляющий собой объект контроля (ОК) на который нанесен слой проводящей пленки на диэлектрическом основании. По периметру пленки расположены  $N$  контактов. Пленка с контактами образует чувствительный элемент (ЧЭ). На первом этапе происходит считывание номеров электродов, которые будут назначены токовыми, из системы управления алгоритмом ЭИТ. Номера могут быть произвольными или определяться алгоритмом. После чего наступает этап считывания из системы так называемого начального паттерна для сбора напряжений для граничных электродов. Таких паттернов может быть несколько, в зависимости от выбранного алгоритма (например, «каждый с каждым», только оппозитные (расположенные напротив друг друга) и т.д.). Паттерн определяет не только расположение электродов, но и порядок проведения измерений. После того как роли электродов ЧЭ для данного измерения определены, происходит коммутация сначала токовых электродов с источником постоянного тока, а затем остальных электродов к измерителю напряжений попарно, согласно выбранному алгоритму. Затем проверяется, произведен ли полный перебор электродов для съема напряжений в соответствии с определенным паттерном. Обычно проверка происходит по номерам электродов. Если проведены не все измерения, номера пары электродов меняются согласно выбранному алгоритму и происходит замер напряжения в новой паре электродов. Каждый результат измерений заносится в память системы.

Если же все измерения проведены, формируется таблица для текущей проекции измерений. Под «проекцией» в данном случае понимают все значения напряжений и адресация соответствующих контактов для конкретной пары токовых электродов. После этого происходит переход к следующей проекции измерений (при необходимости) и пара токовых электродов меняется.

В дальнейшем эта информация используется для анализа и визуализации (построения изображения), например, с помощью компьютера со специализированным программным обеспечением [9].

Это достаточно универсальный алгоритм, который может найти применение в любой системе ЭИТ вне зависимости от ее назначения.

### Система сбора/подачи напряжений на граничные электроды чувствительного элемента

На рис. 1 представлена схема обнаружения поверхностных дефектов методом ЭИТ.

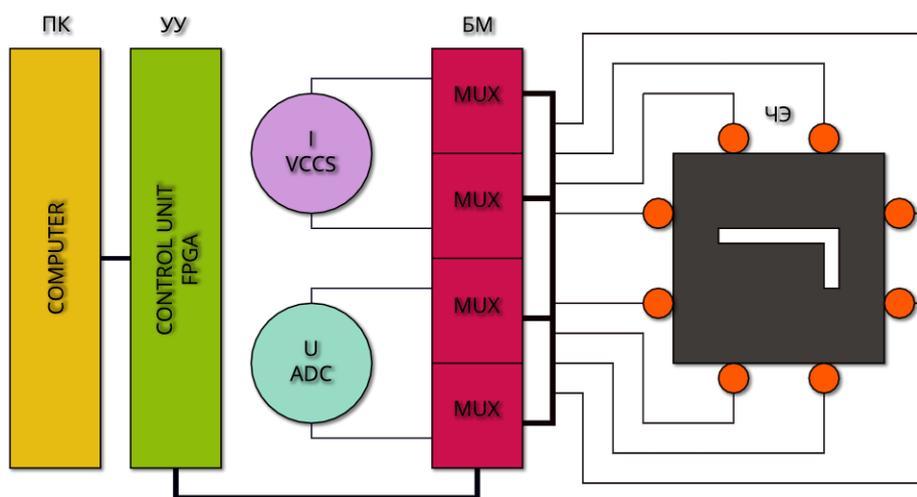


Рис. 1 – Схема обнаружения поверхностных дефектов методом ЭИТ

ЧЭ представляет собой квадратную область с восемью контактами по периметру (по два контакта с каждой стороны). На рис. 2 представлен

пример, когда источник тока подключен к контактам 1 и 2, а между остальными контактами замеряется напряжение по схеме «каждый с каждым» (обозначено розовыми линиями).

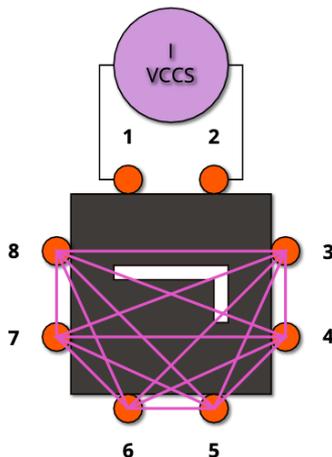


Рис. 2 – Пример коммутации ЧЭ

За автоматическую коммутацию отвечает блок мультиплексоров (БМ). Работает он следующим образом: многоразрядный цифровой управляющий сигнал поступает с устройства управления по управляющей шине (показана жирной линией внизу на рис. 1). В этом сигнале закодирована информация о том, какую пару электродов следует соединить с источником тока, а также какие электроды и в каком порядке нужно подключить к измерителю напряжения. Управляющий сигнал периодически меняется, подключая новые пары электродов к измерительному устройству.

Далее (справа налево) расположены блоки  $I$  VCCS и  $U$  ADC. Это сверхстабильный источник тока, управляемый напряжением и измеритель напряжения. Схемотехническая реализация данных блоков выходит за рамки статьи. Следует отметить, что источник тока состоит из генератора, управляемого напряжением на основе микросхемы ICL8038, и непосредственно источника тока, управляемого напряжением построенного на основе микросхемы операционного усилителя LMC6482A. Измеритель

напряжения представляет собой цифровой вольтметр, полученный на основе микросхемы AD5933.

Левее на рис. 1 расположен блок устройства управления (УУ), который отвечает за сбор и подачу напряжений на граничные электроды чувствительного элемента, определяет паттерны коммутации контактов, хранит полученные данные, передает их далее в компьютер для последующей обработки. Реализация этого блока может быть более низкоуровневой, например, на микроконтроллере, и тогда часть его функционала реализуется схемотехнически; или более высокоуровневой, например, на основе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС), и тогда алгоритм работы реализуется полностью на одной интегральной схеме. В этой работе сделан выбор в пользу второго варианта. На рис. 3 представлено устройство управления. Оно имеет следующие входы: CLK – вход для тактовых импульсов; RESET – позволяет сделать сброс устройства, вернув его в первоначальное состояние; SETUP – позволяет установить начальные значения напряжений в бездефектном образце; REC\_TRANS – входы для управления режимами записи-чтения (проверки наличия дефектов и чтения данных из памяти); ALGO\_SET – позволяет выбрать паттерн замера напряжений; I\_SET и V\_SET – служат для адресации электродов, т.е. позволяют задать номера токовых контактов и контактов, на которых производится замер напряжений в данный момент времени; I\_VALUE и V\_VALUE – служат для передачи значений токов и напряжений (в цифровом виде) в память устройства. Выходы: V\_PAIR – выдает адресацию текущей пары электродов для замера напряжений; I\_OUT и V\_OUT – выдают значения токов и напряжений; RESET\_MODE, SET\_MODE, CHECK\_MODE, READ\_MODE – сигнальные выходы, по состоянию которых можно судить, в каком режиме находится устройство управления.

---

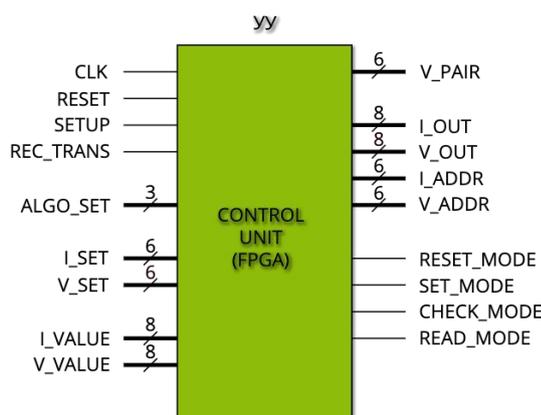


Рис. 3 – Устройство управления – блок, отвечающий за сбор/подачу напряжений на граничные электроды чувствительного элемента

Устройство функционирует следующим образом:

– если на сигнал `reset` подается единица, происходит обнуление информации во всех ячейках памяти и на всех выходах устройства. На выходе-индикаторе `reset` отображается единица;

– если `reset` равен нулю, приходит передний фронт сигнала `clk`, и `setup` равен единице, происходит контрольный замер напряжений на образце без дефектов и данные заносятся в ячейку памяти `mem_v_value`. На выходе-индикаторе `setup` отображается единица;

– если `reset` равен нулю, приходит передний фронт сигнала `clk`, `setup` равен нулю и `rec_trans` равен нулю, происходит замер напряжений на образце с предполагаемыми дефектами и данные заносятся в ячейку памяти `mem_v_value_defect`. На выходе-индикаторе `check_mode` отображается единица;

– если `reset` равен нулю, приходит передний фронт сигнала `clk`, `setup` равен нулю и `rec_trans` равен единице, происходит чтение измеренных напряжений на образце с предполагаемыми дефектами из памяти `mem_v_value_defect`. При необходимости можно передать эти данные на

выход для сравнения с данными для бездефектного образца. На выходе-индикаторе read\_mode отображается единица.

Диаграмма с результатами моделирования УУ приведена на рис. 5.

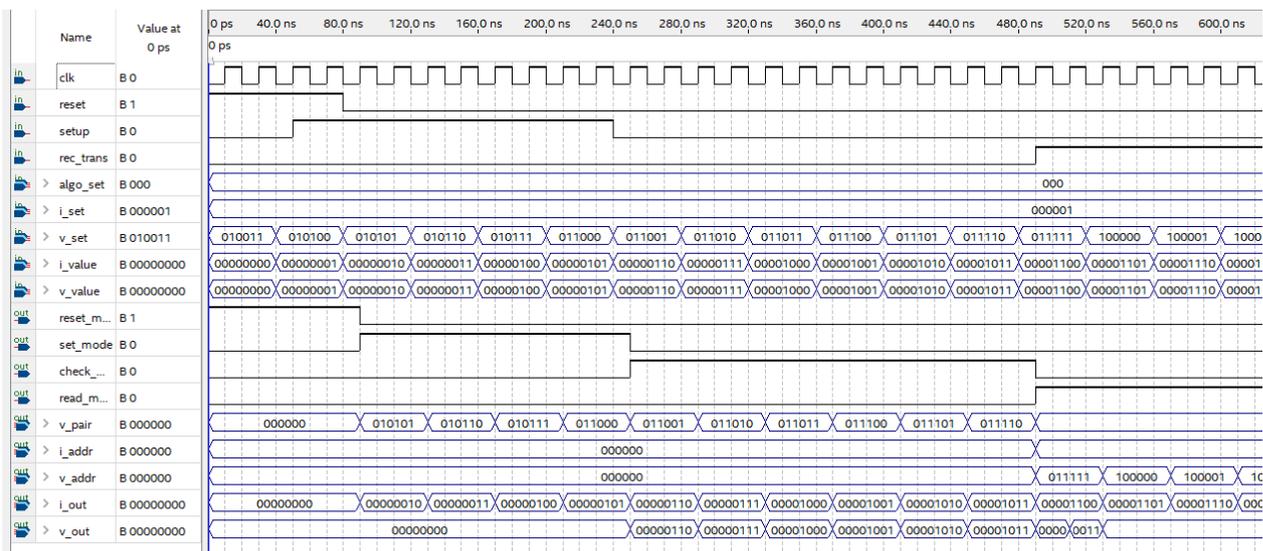


Рис. 5 – Результаты моделирования работы системы сбора/подачи напряжений на граничные электроды чувствительного элемента

Для VHDL-описания УУ получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2020611065 [10].

Последний функциональный блок – это компьютер с соответствующим программным обеспечением, который получает информацию от УУ, анализирует ее, на основе данных реконструирует изображение, позволяющее судить о наличии дефекта.

### Заключение

В статье рассмотрены методика реализации, структура и функциональная схема системы обнаружения поверхностных дефектов на основе метода электроимпедансной томографии в материалах инженерных конструкций, подвергающихся в процессе эксплуатации значительным

нагрузкам. Приведена функциональная схема разработанного авторами устройства управления системой сбора/подачи напряжений на граничные электроды чувствительного элемента и описан алгоритм его работы. Предложен способ реализации и представлены результаты моделирования этой системы. Изготовление и экспериментальные исследования экспериментальных образцов чувствительных элементов и системы сбора/подачи напряжений на граничные электроды чувствительного элемента будут рассмотрены в последующих публикациях.

*Работа подготовлена при финансовой поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (Грант УМНИК 13444ГУ/2018 от 18.07.2018)*

### Литература

1. Лысенко И.Е., Ежова О.А. Критерии равенства собственных частот колебаний чувствительных элементов микромеханических гироскоповакселерометров // Инженерный вестник Дона, 2014, №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2475](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2475).

2. Лысенко И.Е. Моделирование двухосевого микромеханического сенсора угловых скоростей и линейных ускорений LR-типа // Инженерный вестник Дона, 2013, №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1549](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1549).

3. Holder, D. S. Electrical Impedance Tomography, Methods, History and Applications. Institute of Physics Publishing. 2015, pp. 3-64.

4. Рындин Е.А., Исаева А.С. Метод анализа дефектов поверхности конструкций с использованием электроимпедансной томографии // Вестник Южного научного центра РАН. 2013. Т.9. В1. С. 17 – 21.

5. Рындин Е.А., Исаева А.С. Эффективность определения дефектов в тонкой проводящей пленке методом электроимпедансной томографии при неполном переборе комбинаций токовых электродов. Дефектоскопия. – 2017. – №2. –С. 19, 2.

6. Mosquera, V., Arregui, A., Bragós, R. and Rengifo, C. Implementation of a Low Cost Prototype for Electrical Impedance Tomography based on the Integrated Circuit for Body Composition Measurement AFE4300. In Proceedings of the 11th International Joint Conference on Biomedical Engineering Systems and Technologies (BIOSTEC 2018) - Volume 1: BIODEVICES, pp. 121-127.

7. Kusche R., Malhotra A., Ryschka M., Ardelt G., Klimach P., Kaufmann S. A FPGA-Based Broadband EIT System for Complex Bioimpedance Measurements—Design and Performance Estimation. Electronics 2015, 4, pp. 507-525.

8. Пеккер Я.С., Бразовский К.С. Электроимпедансная томография. Томск: Изд-во НТЛ, 2004. - 190 с.

9. Filipowicz, S.F.; Rymarczyk, T. Measurement Methods and Image Reconstruction in Electrical Impedance Tomography. Przegląd Elektrotechniczny 2012, 88, pp. 247–250.

10. Исаева А.С., Денисенко М.А. Программа блока управления цифровыми компонентами системы мониторинга дефектов методом электроимпедансной томографии // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019667768 от 30.12.2019

### References

1. Lysenko I.E., Ezhova O.A. Inzenernyj vestnik Dona, 2014, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2475.

2. Lysenko I.E. Inzenernyj vestnik Dona, 2013, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1549.

3. Holder, D. S. Electrical Impedance Tomography, Methods, History and Applications. Institute of Physics Publishing. 2015, pp. 3-64.



4. Ryndin E.A., Isaeva A.S. Vestnik Juzhnogo nauchnogo centra RAN. 2013. T.9. V1. pp. 17 – 21.
5. Ryndin E.A., Isaeva A.S. Defektoskopija. 2017. №2. pp. 2-19.
6. Mosquera, V., Arregui, A., Bragós, R. and Rengifo, C. Implementation of a Low Cost Prototype for Electrical Impedance Tomography based on the Integrated Circuit for Body Composition Measurement AFE4300. In Proceedings of the 11th International Joint Conference on Biomedical Engineering Systems and Technologies (BIOSTEC 2018). Volume 1: BIODEVICES, pp. 121-127
7. Kusche R., Malhotra A., Ryschka M., Ardelt G., Klimach P., Kaufmann S. A FPGA-Based Broadband EIT System for Complex Bioimpedance Measurements—Design and Performance Estimation. Electronics 2015, 4, pp. 507-525;
8. Pekker Y.S., Brazovskiy K.S. Elektroimpedansnaja tomografija [Electrical Impedance Tomography]. Tomsk: Izd-vo NTL, 2004. 190 P.
9. Filipowicz, S.F.; Rymarczyk, T. Measurement Methods and Image Reconstruction in Electrical Impedance Tomography. Przegląd Elektrotechniczny 2012, 88, pp. 247–250.
10. Isaeva A.S., Denisenko M.A. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja EVM № 2019667768 ot 30.12.2019