

УДК 539.4:537.5

## РАЗРАБОТКА ИМПАКТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ЛОКАЛИЗАЦИИ ДЕФЕКТА В ИЗДЕЛИИ ИЗ БЕТОНА

Т.В. Фурса, Д.Д. Данн, К.Ю. Осипов, С.И. Чеховских

Tomsk polytechnic university

E-mail: fursa@tpu.ru

**Фурса Татьяна Викторовна**, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник Проблемной научно-исследовательской лаборатории электроники диэлектриков и полупроводников Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: fursa@tpu.ru

Область научных интересов: неразрушающий контроль.

**Данн Денис Дмитриевич**, инженер-исследователь Проблемной научно-исследовательской лаборатории электроники диэлектриков и полупроводников Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: DDDann@tpu.ru

Область научных интересов: неразрушающий контроль.

**Осипов Константин Юрьевич**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник Проблемной научно-исследовательской лаборатории электроники диэлектриков и полупроводников Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: osipov@iao.ru

Область научных интересов: неразрушающий контроль.

**Чеховских Станислав Игоревич**, магистрант кафедры физических методов и приборов контроля качества Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: Stas@tpu.ru

Область научных интересов: неразрушающий контроль.

В работе приведены результаты экспериментальных исследований по разработке методики определения места локализации дефекта в изделии из бетона на основе амплитудно-частотного и корреляционного анализа параметров электрического отклика на ударное возбуждение.

### Ключевые слова:

Механоэлектрические преобразования, бетон, электрический отклик, амплитудно-частотные характеристики, дефект, коэффициент взаимной корреляции.

Существует проблема определения дефектных зон в бетонных и железобетонных конструкциях как на этапе входного контроля с целью повышения надежности возводимых сооружений, так и в процессе их эксплуатации. При длительной эксплуатации в условиях воздействия механических напряжений и изменяющихся температуры и влажности в бетоне появляются и развиваются трещины, которые в конечном итоге приводят к непредвиденному разрушению конструкции. Чтобы продлить срок службы конструкций из бетона и обеспечить их безопасную эксплуатацию необходимо иметь достоверную информацию о местоположении дефектных областей, чтобы своевременно осуществлять ремонтно-восстановительные мероприятия или принимать решение о реконструкции отдельных участков или всего инженерного сооружения в целом. Для решения этой проблемы может быть использовано явление механоэлектрических преобразований [1–8]. Проведенные исследования показывают, что параметры электрического отклика на упругое ударное возбуждение зависят от структурных и механических характеристик образцов бетона [9–15].

В рамках данной работы проведены исследования по разработке нового неразрушающего импакт электрического определения места локализации дефекта в изделии из бетона. Метод основан на использовании характеристик электрического отклика на внешнее ударное (импакт) возбуждение в качестве информативного параметра для дефектоскопии армированных материалов.

Для решения задачи определения дефектных зон в изделиях из бетона необходимо иметь информацию о пространственном изменении параметров электромагнитного сигнала по площади исследуемого изделия. Одним из методов получения пространственной картины является метод сканирования. Для осуществления процедуры механоэлектрического сканирования

изделий был разработан и создан выносной измерительный зонд, позволяющий осуществлять ударное возбуждение исследуемого изделия и регистрацию электрического отклика на произведенное возбуждение.

Ударное возбуждение осуществляется с помощью электромеханического ударного устройства с нормированной силой удара порядка 10 Н. Для регистрации электрического сигнала используется дифференциальный электрический датчик, закрепленный на корпусе ударного устройства и позволяющий существенно повысить соотношение сигнал-помеха. Измерительный приемник располагается на расстоянии 2 мм от поверхности образца, а компенсационный – параллельно измерительному, на высоте 30 мм от него. В непосредственной близости с приемниками для снижения потерь сигналов в проводах на корпусе ударника закреплена плата с согласующей электроникой для передачи измеренных сигналов на регистрирующую систему. Сигнал с электрического датчика регистрируется с помощью многофункциональной платы ввода-вывода «NI PCI-6251», позволяющей осуществлять оцифровку временной реализации электрического сигнала.

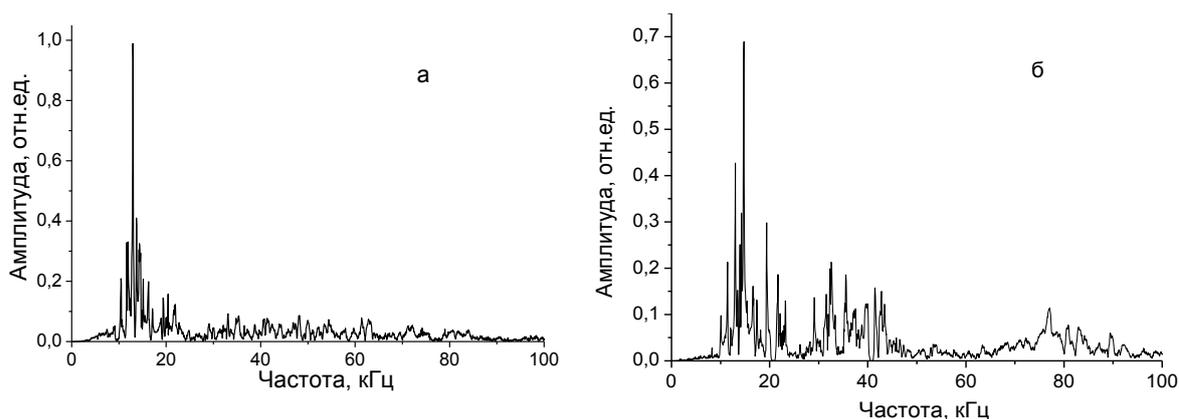
Использование длинных проводов позволяет перемещать измерительный зонд на значительные расстояния от стационарного оборудования (ЭВМ и источников питания для электроники и ударного устройства) и производить сканирование крупногабаритных изделий и конструкций.

На первом этапе были проведены исследования влияния на параметры электрического сигнала местоположения дефектной области относительно приемного датчика.

Для этого были изготовлены модельные цементно-песчаные образцы размером 100×100×100 мм с внешними искусственными трещинами, расположенными на одной из поверхностей образца. Искусственные трещины были созданы путем введения в форму с жидким цементно-песчаным раствором полиэтиленовых пластинок размером 20×10×1 мм. Через 3 часа после затвердения пластины удалялись и в образцах оставались полости, моделирующие трещины соответствующего размера, локализованные с одной стороны образца.

Образец с искусственными дефектами располагался таким образом, чтобы дефектная поверхность была боковой. Удар производился по центру верхней поверхности образца, приемный датчик (размером 25×25 мм) располагался параллельно верхней поверхности на расстоянии 20 мм от точки удара. Сначала датчик располагался вблизи бездефектной, а затем дефектной боковой поверхности образца.

На рис. 1 приведены спектры электрических сигналов при расположении приемного датчика вблизи дефектной и бездефектной области образца.



**Рис. 1.** Спектры электрического сигнала из цементно-песчаного образца: а) бездефектной области; б) дефектной области

Из рис. 1 видно, что при расположении приемного датчика вблизи дефектной области образца спектр электрического сигнала становится более широким. Удаление приемного датчика от дефектной области на расстояние 50 мм приводит к тому, что спектр электрического сигнала становится близким к спектру сигнала из бездефектного образца. Полученные резуль-

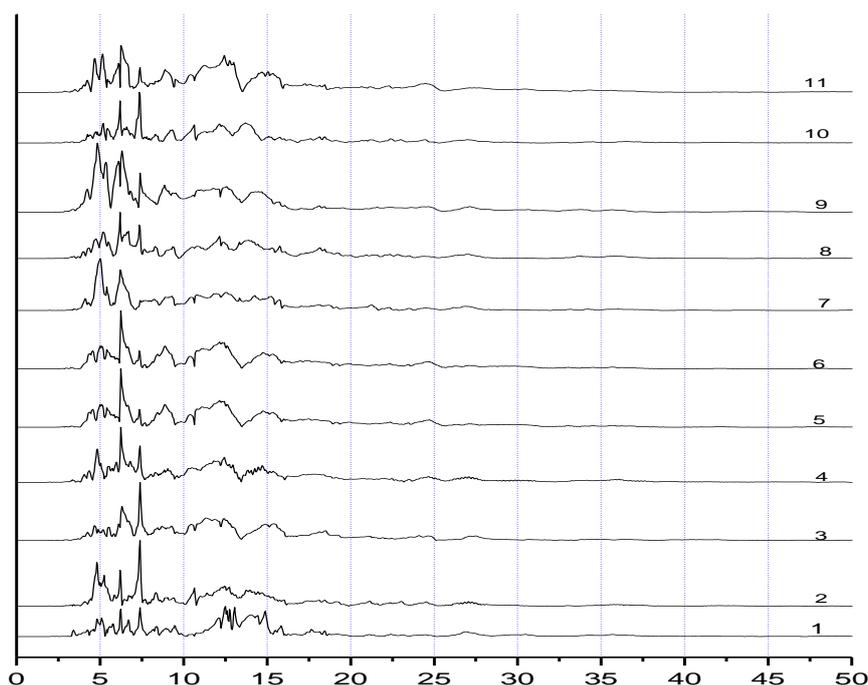
таты свидетельствуют о возможности разработки метода определения дефектной области в бетонных материалах по параметрам электрического отклика на ударное возбуждение.

Для проведения исследований были изготовлены две модели тяжелого бетона размером  $110 \times 200 \times 300$  мм. Одна модель не имела дефектов, а вторая содержала искусственный дефект в виде воздушной полости. В качестве дефекта, моделирующего внутреннюю воздушную полость, использовалась загерметизированная коробка из винипласта размером  $30 \times 20 \times 10$  мм. Герметизация достигалась путем покрытия ее эпоксидной смолой. Этот искусственный дефект вносился в жидкий раствор в процессе изготовления модели. Испытание проводили после окончания процесса твердения модели (через 28 дней). Воздушная полость расположена на глубине 30 мм и на расстоянии 70 мм от края образца.

Перед проведением процедуры сканирования поверхность исследуемых изделий разбивается на квадраты. Размер квадрата определяется тем, какая необходима степень детализировки изменения параметров электрического отклика по заданной поверхности.

Следующим этапом на бездефектной модели были проведены исследования характера трансформации параметров электромагнитного отклика при испытании различных участков поверхности модели. Были проведены исследования характера трансформации параметров электрического отклика при испытании различных участков поверхности модели. Для этого проводились последовательные измерения электрического отклика при смещении измерительного зонда вдоль поверхности изделия размером  $200 \times 300$  мм с шагом равным 25 мм.

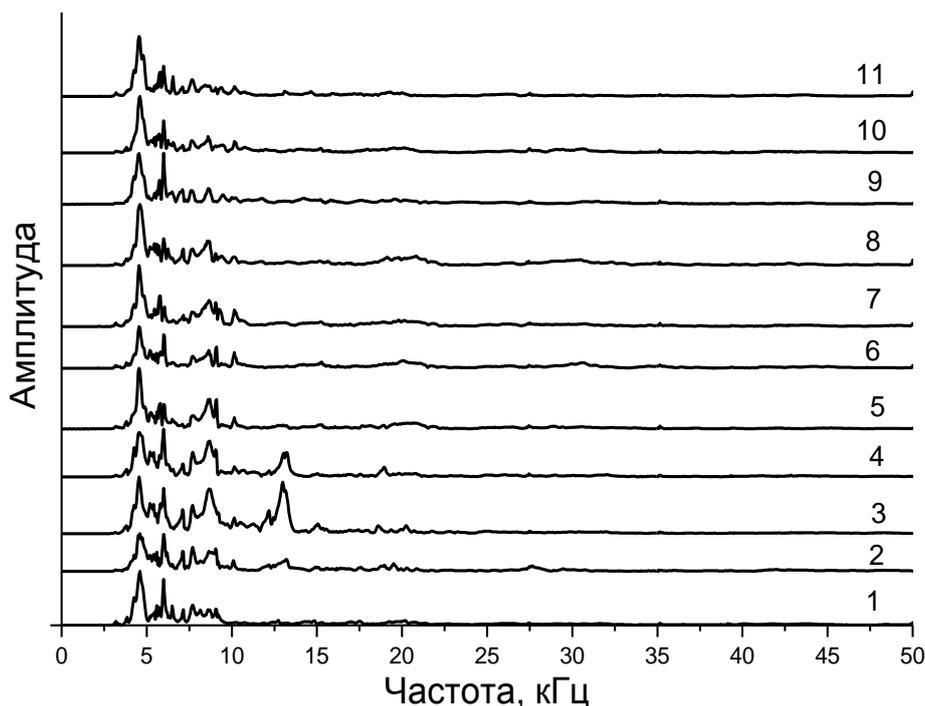
На рис. 2 приведены амплитудно-частотные характеристики электрических сигналов, зарегистрированные из бездефектной модели при сканировании вдоль длины исследуемой поверхности размером  $200 \times 300$  мм по линии, являющейся центром ширины модели.



**Рис. 2.** Амплитудно-частотные характеристики электромагнитных сигналов из бездефектного образца

Результаты сканирования поверхности бездефектного образца вдоль его длины показывают, что спектральный состав электромагнитных сигналов не претерпевает значительных изменений в зависимости от местоположения точки испытания на поверхности бездефектного изделия.

На рис. 3 приведены спектры электрических сигналов при сканировании вдоль длины модели с искусственным дефектом.



**Рис. 3.** Амплитудно-частотные характеристики электрических сигналов из модели тяжелого бетона с искусственным дефектом

Из рис. 3 видно, что спектр электрического сигнала, зарегистрированный в области дефекта (кривые 3 и 4), имеет отличительные особенности, а именно – появление значимых спектральных максимумов в области 12...14 кГц. Появление более высокочастотных максимумов может являться следствием возникновения отраженных от дефекта акустических волн, возбуждающих источники механоэлектрических преобразований. Спектры из областей, где нет дефекта, имеют близкую друг к другу форму.

В работе [14] в качестве критерия оценки дефектности (трещиноватости) в образцах бетона размером 50×50×100 мм было предложено использовать максимальный коэффициент взаимной корреляции спектра электрического сигнала из дефектного материала по сравнению со спектром бездефектного образца. Показано, что данный алгоритм позволяет определять общую длину трещин, возникших в материале под действием циклического замораживания–оттаивания [15].

С помощью программы в среде программирования LabView осуществлялось последовательное смещение амплитудно-частотной характеристики сигнала относительно контрольного спектра, рассчитывался выборочный коэффициент корреляции по формуле:

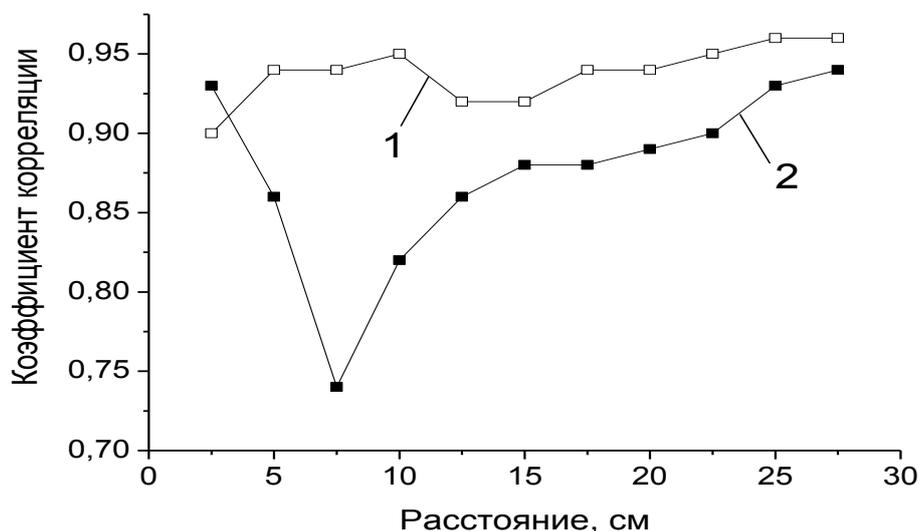
$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}},$$

где  $X_i$  и  $Y_i$  – две сравниваемые последовательности;  $\bar{X}$  и  $\bar{Y}$  – их средние значения;  $n$  – объем выборки (количество точек по оси частоты амплитудно-частотной характеристики сигнала), и определялся максимальный коэффициент взаимной корреляции двух сравниваемых амплитудно-частотных характеристик электрических сигналов и величина смещения (по частоте), при котором наблюдается максимальный коэффициент корреляции.

В данном случае в качестве контрольного спектра, характеризующего собой бездефектную область, использован спектр, изображенный на рис. 3, кривая 9. Для бездефектной модели

в качестве контрольного спектра также использовался спектр, зарегистрированный из той же области модели, как и для дефектной.

На рис. 4 приведена динамика изменения коэффициента корреляции при сканировании бездефектной (1) и дефектной (2) модели размером 110×200×300 мм. В данном случае вместо номеров точек сканирования приведена зависимость от расстояния по длине модели.



**Рис. 4.** Изменение коэффициента корреляции спектра электромагнитного сигнала при сканировании дефектной и бездефектной моделей со спектром сигнала, зарегистрированного из соответствующей модели в точке 225 мм

Как видно из рис. 4, различия в величине коэффициента корреляции для бездефектной модели колеблется в диапазоне от 0,9 до 0,96, то есть максимальные изменения коэффициента корреляции составляют 6,25 %. В дефектной модели максимальные изменения величины коэффициента корреляции происходят от 0,74 до 0,94, что составляет 21,2 %.

Минимальная величина коэффициента корреляции наблюдается в области расположения дефекта.

Приведенные результаты показывают, что с использованием амплитудно-частотного и корреляционного анализа электрического отклика на ударное возбуждение можно определять местоположение дефекта в изделии из бетона.

*Работа выполнена в рамках государственного задания «Наука» (№ 7.1826.2011) и гранта РФФИ (№ 11-08-01102-а).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фурса Т.В. О механизме механоэлектрических преобразований при ударном возбуждении композиционных материалов на основе цементного вяжущего // ЖТФ. — 2001. — Т. 71. — № 7. — С. 53–56.
2. Суржиков А.П., Фурса Т.В., Хорсов Н.Н. К вопросу о механизме механоэлектрических преобразований в бетонах // ЖТФ. — 2001. — Т. 71. — № 1. — С. 57–61.
3. Суржиков А.П., Фурса Т.В. Механоэлектрические преобразования при упругом ударном возбуждении композиционных диэлектрических материалов // ЖТФ. — 2008. — Т. 78. — № 4. — С. 71–76.
4. Фурса Т.В., Савельев А.В., Осипов К.Ю. Исследование взаимосвязи параметров электромагнитного отклика из диэлектрических материалов с характеристиками ударного возбуждения // ЖТФ. — 2003. — Т. 73. — № 11. — С. 59–63.
5. Фурса Т.В., Данн Д.Д. Механоэлектрические преобразования в гетерогенных материалах, содержащих пьезоэлектрические включения // ЖТФ. — 2011. — Т. 91. — № 8. — С. 53–58.

6. Фурса Т.В., Осипов К.Ю. Механоэлектрические преобразования в композиционных диэлектрических материалах при комплексном термомеханическом возбуждении // Дефектоскопия. – 2003. – № 10. – С. 33–37.
7. Фурса Т.В., Осипов К.Ю. Исследование механоэлектрических преобразований в цементно-песчаных образцах в процессе циклического знакопеременного температурного воздействия // Письма в ЖТФ. – 2009. – Т. 35. – №1 9. – С. 61–68.
8. Фурса Т.В. Исследование механоэлектрических преобразований в образцах цементного раствора в процессе трещинообразования, вызванного циклическим замораживанием–оттаиванием // Письма в ЖТФ. – 2010. – Т. 36. – № 8. – С. 1–6.
9. Фурса Т.В., Суржиков А.П., Гольд Р.М. Электромагнитный способ определения твердости материалов // Дефектоскопия. – 2001. – № 9. – С. 20–22.
10. Фурса Т.В., Хорсов Н.Н., Романов Д.Б. Взаимосвязь качества контакта элементов композиционных материалов с параметрами электромагнитного отклика на ударное возбуждение // Дефектоскопия. – 2001. – № 9. – С. 23–26.
11. Фурса Т.В., Найден Е.П., Осипов К.Ю., Усманов Р.У. Особенности механоэлектрических преобразований в диэлектрических материалах в области структурных фазовых превращений // ЖТФ. – 2004. –Т. 74. – № 12. – С. 52–55.
12. Фурса Т.В., Суржиков А.П., Осипов К.Ю. Разработка акустоэлектрического метода определения пористости диэлектрических материалов // Дефектоскопия. – 2007. – № 2. – С. 27–34.
13. Фурса Т.В., Осипов К.Ю., Данн Д.Д. Разработка неразрушающего метода контроля прочности бетона с дефектной структурой на основе явления механоэлектрических преобразований // Дефектоскопия. – 2011. – № 5. – С. 39–47.
14. Фурса Т.В., Осипов К.Ю., Данн Д.Д. Разработка метода контроля динамики изменения дефектности бетона под действием циклического замораживания-оттаивания на основе явления механоэлектрических преобразований // Письма в ЖТФ. – 2011. – Т. 37. – № 7. – С. 1–7.
15. Фурса Т.В., Осипов К.Ю., Данн Д.Д. Разработка метода определения концентрации и местоположения трещин в бетонах на основе явления механоэлектрических преобразований // Вестник науки Сибири. – 2012. – № 4 (5). – С. 89–94. URL: <http://sjs.tpu.ru/journal/article/view/426> (дата обращения: 10.01.2013).

Поступила 14.02.2013 г.