

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПРИКЛЕИВАЕМОГО И ПРИМАГНИЧИВАЕМОГО ЦТС-ДАТЧИКОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТОДА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ИМПЕДАНСА В ЦЕЛЯХ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

© 2022 г. С.К. Сингх<sup>1,\*</sup>, Р. Шанкер<sup>1,\*\*</sup>

<sup>1</sup>Национальный технологический институт Мотилала Неру в Аллахабаде,  
Праяградж, 211004 Индия  
E-mail: \*sachin6738@gmail.com; \*\*ramashanker@mnnit.ac.in

Поступила в редакцию 08.07.2022; после доработки 09.08.2022  
Принято к публикации 12.08.2022

Метод электромеханического импеданса (ЭМИ) является одним из важных методов в области мониторинга состояния конструкций. Повреждение на начальном этапе может быть легко обнаружено с помощью этого метода по сравнению с другими. Исследователями были предложены различные конфигурации ЦТС-датчиков для метода ЭМИ, которые имеют свои преимущества и недостатки. В данной работе приклеиваемый ЦТС-датчик (КЦД) и примагничиваемый ЦТС-датчик (МЦД) используются для контроля дефектов в стальной балке двутаврового сечения. В балке создаются повреждения, и с помощью статистических методов производится их количественная оценка. При анализе результатов было обнаружено, что МЦД имеет большую зону чувствительности, чем КЦД. Это связано с отсутствием эффекта сдвигового запаздывания в МЦД, чего нет в случае КЦД. Задержка сдвига влияет на механизм передачи деформации между ЦТС-датчиком и объектом, на котором данный датчик и располагается. Область чувствительности МЦД достигает 3,5 м, в то время как область чувствительности КЦД составляет менее 2,0 м в случае стальной балки.

*Ключевые слова:* контроль состояния конструкций, метод электромеханического импеданса, приклеиваемый ЦТС-датчик, примагничиваемый ЦТС-датчик.

DOI: 10.31857/S0130308222100062, EDN: BTKVCC

### ВВЕДЕНИЕ

Многие гражданские инженерные сооружения (такие как мосты, высотные здания, плотины, железные дороги и метро) играют значительную роль для транспортных сетей, социальной жизни и экономики. Срок службы многих из этих сооружений подходит к концу из-за экономической нецелесообразности их реконструкции. Исследователи и инженеры-строители в последнее время уделяют большое внимание контролю состояния конструкций (КСК) для долгосрочного мониторинга и обнаружения потенциальной деградации конструкций. Были разработаны различные методы КСК [1—6], которые должны использоваться в соответствии с требованиями, из которых хорошо зарекомендовал себя метод электромеханического импеданса (ЭМИ) при контроле зарождающихся повреждений, обладая высокой точностью.

Датчики, используемые в методе ЭМИ, обычно приклеиваются к объектам контроля эпоксидной смолой для выявления структурных дефектов. Такие датчики, с другой стороны, уязвимы к повреждениям. Диагностика датчиков — это область исследования, которая сосредоточена на поиске неисправных датчиков. Хотя очевидно, что продолжение создания систем КСК необходимо как по соображениям безопасности, так и по экономическим причинам, создание сенсорной диагностики для этих методов КСК можно считать не менее важным. Диагностика датчиков позволяет системе мониторинга определять целостность датчиков и отличать повреждения датчиков от дефектов конструкции.

Существуют различные типы датчиков, разработанные для решения конкретных задач. Для мониторинга ранней гидратации бетона и состояния конструкций была создана концепция многоцветового ЦТС-датчика. Такая схема датчика состоит из ЦТС-элемента, соединенного с корпусом двумя болтами, которые затем затягиваются в отверстиях, просверленных в корпусе [7]. Аналогичный многоцветовый датчик был создан с использованием болта, металлического стержня и ЦТС-пластины, которая крепится на болт, который в свою очередь крепится к металлическому стержню. Стержень вставляется в бетон во время заливки, что может быть использовано для мониторинга гидратации цемента. Этот датчик можно использовать повторно, удалив болт [8]. Также был предложен беспроводной датчик, который можно поместить в бетон во время заливки и использовать для мониторинга прочности бетона и его разрушения [9]. Для оценки прочности высокопрочного бетона был предложен встраиваемый ЦТС-датчик, изготовленный из полого

полусферического стирола [10]. Для мониторинга раннего нарастания показателей механической прочности цементных материалов был разработан датчик на основе интеллектуального зонда, использующий металлическую полосу с ЦТС-датчиком, приклеенным с одной стороны [11]. Другой датчик был изготовлен в форме кольцевого диска и встроен в конец стального прута для распознавания повреждений вследствие коррозии и образования трещин [12]. Было установлено, что пьезоэлектрический цементный датчик, состоящий из цемента и пьезоэлектрического композита, работает лучше, чем обычный ЦТС-датчик, поскольку у него больше изменение электрического импеданса [13].

Большинство методов обнаружения дефектов требуют большого количества датчиков, распределенных по всей конструкции для достаточного охвата области контроля. Большинство из этих датчиков могут работать в неблагоприятных условиях эксплуатации и окружающей среды. Механические воздействия, аварии или другие непредвиденные чрезвычайные происшествия способны повредить даже датчики, подключенные в безопасном месте. Если датчик, подключенный к системе мониторинга, не выдает никаких выходных сигналов как от окружающей среды, так и от внешнего воздействия, то, скорее всего, датчик был выведен из строя. Даже если датчик каким-то образом повредился, он все равно в некоторой степени работоспособен, может реагировать на внешнее воздействие и выдавать, как кажется, достаточный отклик. Датчик с поломками или недостаточным сцеплением, которые могут быть вызваны воздействием растворителя, ударами и усталостью, может существенно изменить свойства сигнала и привести к ошибочным заключениям о наличии повреждения. Перед каждым измерением состояние каждого датчика должно быть проверено для максимального обеспечения представления о целостности конструкции. Поэтому для преодоления этого недостатка исследователями был предложен примагничиваемый ЦТС-датчик (МЦД), который может применяться, если известно состояние конструкции. Крепление МЦД не требует наличие связующего слоя из эпоксидной смолы, а работа датчика SMPS объясняется в другом разделе.

Влияние связующего слоя на измерения импеданса было изучено рядом исследователей. Bhalla и Soh [4] исследовали влияние сдвига через связующий слой на электромеханические модели импеданса, такие как пьезоэлектрическая активация и зондирование, созданные Crawley и de Luis [5] и Sirohi и Chopra [6] соответственно. Bhalla и Soh [4] показали, что связующий слой может оказывать существенное влияние на наблюдаемые сигналы электрического сопротивления, добавляя эффекты потерь на сдвиг через клей и расширяя предыдущие модели до 2D. Чтобы уменьшить влияние пограничного слоя на регистрируемые данные, авторы рекомендовали использовать тонкий слой клея с высоким модулем сдвига и как можно меньший пьезоэлектрический слой.

В данной работе как КЦД, так и МЦД используются на стальной балке двутаврового сечения, искусственные повреждения создаются в балке путем разрезания в одной точке. Получены зависимости проводимости от частоты в исходном состоянии и на различных стадиях повреждения. Количественная оценка повреждений была выполнена на основе статистического анализа.

## МЕТОД ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ИМПЕДАНСА

Пьезоэлектрик обладает свойством изменять форму при приложении к нему электрического потенциала, что называется обратным пьезоэффектом, и, наоборот, генерировать электрический заряд при наведении в нем деформации, что называется прямым пьезоэффектом. Это свойство пьезоэлектрического материала делает его пригодным для использования в качестве датчика и актуатора в области контроля состояния конструкций. Они имеют небольшие размеры, малый вес и обеспечивают лучшую чувствительность.

Согласно данной методике, датчик цирконата-титаната свинца (ЦТС) приклеивается к участку конструкции, данный участок электрически возбуждается с помощью LCR-метра напряжением 1 В в широком диапазоне частот 30—400 кГц, одновременно с этим регистрируется характеристики сигнала для каждой частоты в этом диапазоне. Характеристики сигнала записываются в виде зависимости сопротивления ЦТС-датчика от частоты. Адмиттанс ЦТС-пластины определяет сопротивление объекта, к которому он приклеен, которое зависит от массы, жесткости и демпфирующих свойств материала конструкции. При подаче электрического потенциала на ЦТС-датчик индуцируется деформация, которая далее передается конструкции. После передачи деформации упругие волны распространяются через материал и отражаются от дефектов, границ и любых других препятствий. Возвращаясь обратно, упругие волны собирают информацию о материале, что, в свою очередь, приводит к вибрациям ЦТС-датчика, в котором благодаря прямому воздействию генерируется электрический заряд, регистрируемый в различных диапа-

зонах частот с помощью LCR-метра. Эта последовательность действий повторяется всякий раз, когда необходимо узнать состояние объекта. Любое изменение в форме сигнала по сравнению с ранее полученной свидетельствует о повреждении конструкции. Для количественной оценки повреждений, определения местоположения повреждений и оценки оставшегося срока службы конструкции были проведены многочисленные исследования [14—20]. За последние два десятилетия такая методика получила большее развитие для комплексного использования в данной области [21—26]. Начальный уровень трещин или любые незначительные изменения в конструкции легко обнаруживаются. Более поздние исследования также показали его эффективность для глобальных повреждений, а также для более низкого диапазона частот [27]. Эти сигналы уникальны для конструкции, если только конструкция не претерпела физических изменений, таких как изменение температуры, жесткости, массы или демпфирования, во время которых формы сигналов не остаются такими же и изменяются. В результате любое повреждение конструкции вызывает изменения в связанных с ней структурных параметрах, которые впоследствии могут быть замечены как изменение параметров адмиттанса конструкции. Метод ЭМИ очень чувствителен к ранним признакам повреждения. В результате раннее обнаружение и быстрое реагирование могут предотвратить его дальнейшее распространение и полное разрушение конструкции.

Liang [28] впервые предложил одномерную импедансную модель электромеханической системы. ЦТС-датчик считается бесконечно малым по сравнению со всей конструкцией, поэтому его масса и жесткость не учитываются. Переменное электрическое поле прикладывается в направлении '3', как показано на рис. 1, что приводит к колебаниям ЦТС в направлении '1'. ЦТС-датчик закреплен с одной стороны, а другая сторона испытывает импеданс  $Z$  от объекта. ЦТС-пластина действует как тонкий стержень, испытывающий осевые колебания. Электромеханическая модель показана на рис. 1. Ее комплексный коэффициент передачи определяется согласно уравнению:

$$\bar{Y} = 2\omega j \frac{wl}{h} \left[ \left( \bar{\epsilon}_{33}^T - d_{31}^2 \bar{Y}^E \right) + \left( \frac{Z_a}{Z + Z_a} \right) d_{31}^2 \bar{Y}^E \left( \frac{\tan \kappa l}{\kappa l} \right) \right], \quad (1)$$

где  $\bar{Y}$  — адмиттанс (обратный импеданс);  $\bar{Y}^E$  — модуль Юнга;  $d_{31}$  представляет пьезомодуль;  $\bar{\epsilon}_{33}^T$  — комплексная диэлектрическая постоянная ЦТС в отсутствии механических напряжений соответственно;  $d$  — это тангенс угла диэлектрических потерь ЦТС;  $Z$  и  $Z_a$  — механический импеданс конструкции и ЦТС-пластины соответственно.

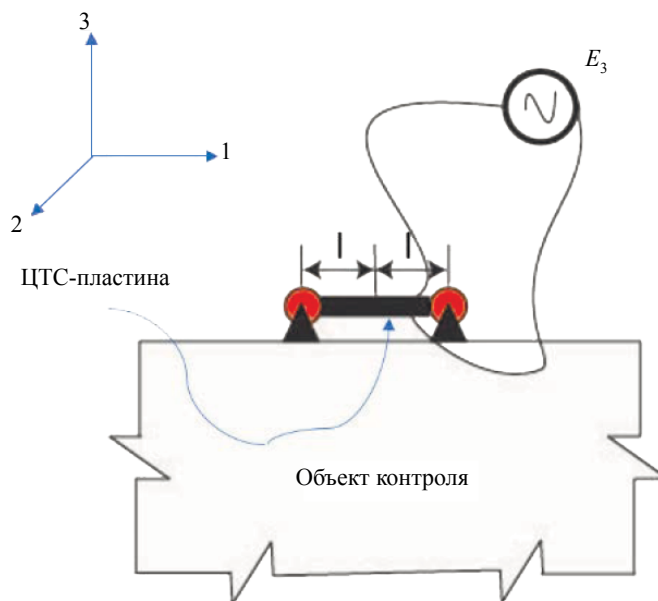


Рис. 1. ЦТС-пластина, приклеенная к объекту.

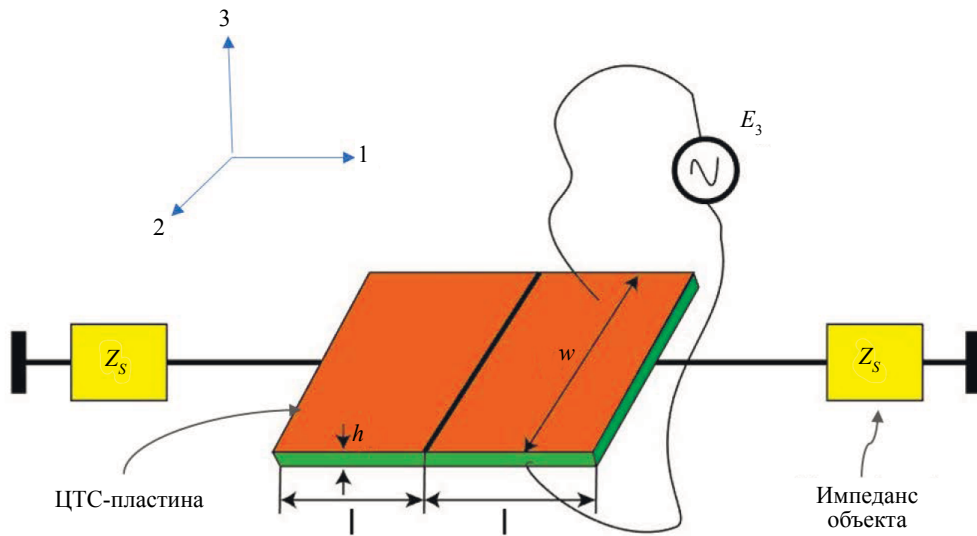


Рис. 2. 2D-модель импеданса между ЦТС-пластиной и объектом.

В этой точечной модели основным недостатком было то, что ЦТС-пластина считалась приклеенной только на внешней граничной поверхности, в то время как ЦТС-датчик приклеивается к поверхности структуры полностью, что приводит к дальнейшему совершенствованию модели.

Далее Bhalla и Soh [4] предложили 2D-модель импеданса, которая показана на рис. 2, используя идею «эффективного импеданса» и получая следующее выражение для адмиттанса ЦТС-пластины:

$$\bar{Y} = G + Bj = 4\omega j \frac{l^2}{h} \left[ \frac{\epsilon_{33}^T}{\epsilon_{33}^T} - \frac{2d_{31}^2 Y^E}{(1-\nu)} + \frac{2d_{31}^2 Y^E}{(1-\nu)} \left( \frac{Z_{a,eff}}{Z_{s,eff} + Z_{a,eff}} \right) \bar{T} \right], \quad (2)$$

где  $\bar{T}$  — комплексная касательная, а  $l$  — половина длины пластины. В свою очередь, адмиттанс, рассчитываемый по уравнению (2), можно разбить на две части:

$$\bar{Y} = \bar{Y}_p + \bar{Y}_A, \quad (3)$$

где  $\bar{Y}_A$  — «активная» компонента и  $\bar{Y}_p$  — «пассивная» компонента.  $\bar{Y}_p$  можно разделить на действительную и мнимую части:

$$\bar{Y}_p = G_p + B_p j; \quad (4)$$

$$G_p = \frac{4\omega l^2}{h} \{ \delta \epsilon_{33}^T + K \eta \}; \quad (5)$$

$$B_p = \frac{4\omega l^2}{h} \{ \epsilon_{33}^T - K \}; \quad (6)$$

$$K = \frac{2d_{31}^2 Y^E}{(1-\nu)}. \quad (7)$$

Такая разработанная аналитическая модель показывает хорошую корреляцию с экспериментом.

### ЭФФЕКТ СДВИГОВОГО ЗАПАЗДЫВАНИЯ НА МОДЕЛЬ ИМПЕДАНСА

Для моделирования эффекта сдвигового запаздывания на импеданс рассматривался ЦТС-датчик, который показан на рис. 3 и 4. Датчик прикрепляется к объекту с помощью клея и возбуждается источником переменного напряжения. На рис. 4 показана правая половина симметричной системы ЦТС-пластины. Сама пластина считается бесконечно малой. Используя принцип д'Аламбера, уравнение для ЦТС можно записать как

$$\tau w_p dx + (dm) \frac{\partial^2 u_p}{\partial t^2} = \frac{\partial T_p}{\partial x} t_p w_p dx. \quad (8)$$

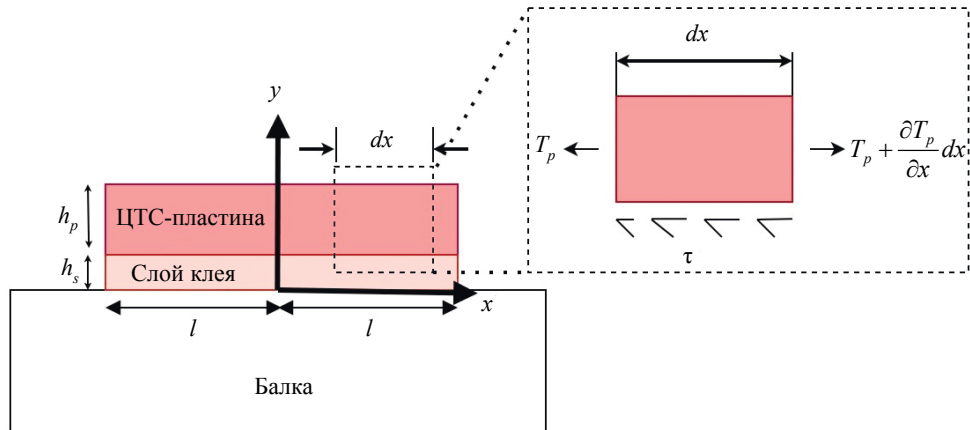


Рис. 3. ЦТС-пластина, приклеенная к балке с помощью клея.

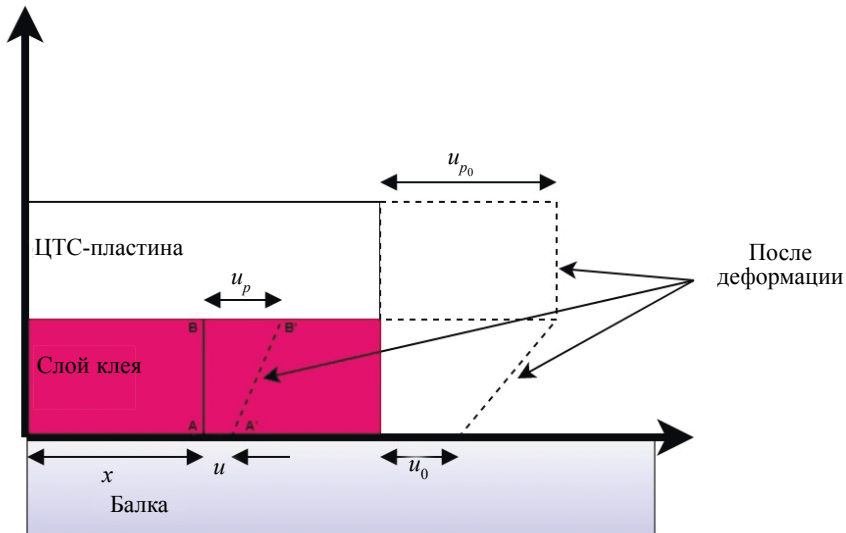


Рис. 4. Деформация слоя клея и пластины.

Пластина имеет полудлину  $l$ , ширину  $w_p$ , толщину  $h_p$ , а связующий слой обладает толщиной  $h_s$ . Балка имеет глубину  $h_b$  и ширину  $w_b$ . Пусть  $T_p$  — осевое напряжение в ЦТС-пластине;  $\tau$  — напряжение межфазного сдвига;  $dm$  — бесконечно малая масса;  $u_p$  обозначает смещение между ЦТС-пластиной и слоем клея;  $u$  — смещение между слоем клея и материалом основы. Инерциальным членом пренебрегаем из-за преобладания члена напряжения сдвига в уравнении (8), такое предположение может привести уравнение (8) к виду:

$$\tau = \frac{\partial T_p}{\partial x} t_p. \quad (9)$$

Допуская деформацию чистого сдвига в связующем слое:

$$\tau = \frac{\overline{G}_s (u_p - u)}{t_s}, \quad (10)$$

где  $\overline{G}_s = G_s (1 + \eta' j)$  — комплексный модуль сдвига связующего слоя, а  $\eta'$  — тангенс угла механических потерь, связанный с наличием связующего слоя. Осевое напряжение в ЦТС-пластине определяется как

$$T_p = \overline{Y}^E (u'_p - \Lambda), \quad (11)$$

где  $\overline{Y}^E$  — комплексный модуль Юнга ЦТС-пластины;  $u'_p$  — деформация ЦТС;  $\Lambda = E_3 d_{31}$  — свободная пьезоэлектрическая деформация. Подставляя уравнение (10) и (11) в уравнение (9), мы получим:

$$u_p - u = \left( \frac{\overline{Y}^E t_p t_s}{\overline{G}_s} \right) u''_p. \quad (12)$$

Сила, которая направлена на объект, связана с полным входным сопротивлением  $Z$  объекта следующим образом:

$$F = -Z \dot{u}, \quad (13)$$

где  $\dot{u}$  — полная скорость на поверхности объекта. Далее уравнение (13) может быть упрощено как

$$T_p w_p t_p = -Z u j \omega. \quad (14)$$

Подставляя уравнение (11) и дифференцируя его по переменной  $x$ , получаем:

$$u''_p = - \left( \frac{Z j \omega}{w_p t_p \overline{Y}^E} \right) u'. \quad (15)$$

В уравнении (12) выразим  $u''_p$ :

$$u''_p = \left( \frac{\overline{G}_s}{\overline{Y}^E t_p t_s} \right) (u_p - u). \quad (16)$$

Подставим уравнение (16) в уравнение (15) и преобразуем его:

$$u_p - u = - \left( \frac{Z t_s j \omega}{\overline{G}_s w_p} \right) u'. \quad (17)$$

Продифференцировав уравнение (17) дважды по переменной  $x$ , получаем:

$$u''_p = u'' - \left( \frac{Z t_s j \omega}{\overline{G}_s w_p} \right) u'''. \quad (18)$$

Подставим уравнения (17) и (18) в уравнение (12), затем продифференцируем его по переменной  $x$ :

$$u'''' + \left( - \frac{w_p \overline{G}_s}{Z t_s j \omega} \right) u'''' - \left( \frac{\overline{G}_s}{\overline{Y}^E t_s t_p} \right) u'' = 0. \quad (19)$$

Пусть

$$\bar{p} = -\frac{w_p \overline{G_s}}{Z t_s j \omega}. \quad (20)$$

Подставим  $Z = x + yi$ ,  $(\overline{G_s}) = G_s(1 + \eta'j)$  и упростим:

$$\bar{p} = a + bj, \quad (21)$$

где

$$a = \frac{w_p G_s (y - \eta'x)}{\omega t_s (x^2 + y^2)} \quad \text{и} \quad b = \frac{w_p G_s (y + \eta'x)}{\omega t_s (x^2 + y^2)}. \quad (22)$$

Поскольку  $\eta$  и  $\eta'$  — очень малые величины, коэффициент перед  $u_p''$  можно записать как

$$q = \frac{\overline{G_s}}{Y^E t_s t_p} \approx \frac{G_s}{Y^E t_s t_p}. \quad (23)$$

Результирующее дифференциальное уравнение (19) можно выразить:

$$u'''' + \bar{p}u''' - qu_p'' = 0. \quad (24)$$

Характеристическое уравнение:

$$\lambda^4 + \bar{p}\lambda^3 - q\lambda^2 = 0. \quad (25)$$

Решив его, получим корни характеристического уравнения:

$$\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 0, \lambda_3 = \frac{-\bar{p} + \sqrt{\bar{p}^2 + 4q}}{2}, \lambda_4 = \frac{-\bar{p} - \sqrt{\bar{p}^2 + 4q}}{2}. \quad (26)$$

Следовательно, решение дифференциального уравнения (24) можно записать как

$$u = A_1 + A_2x + B e^{\lambda_3 x} + C e^{\lambda_4 x}. \quad (27)$$

Константы  $A$ ,  $B$  и  $C$  определяются, исходя из начальных условий.

Дифференцируя по переменной  $x$ , получаем:

$$u' = A_2 + B\lambda_3 e^{\lambda_3 x} + C\lambda_4 e^{\lambda_4 x}. \quad (28)$$

Подставляя уравнения (27) и (28) в уравнение (17), имеем:

$$u_p = (A_1 + A_2x + B e^{\lambda_3 x} + C e^{\lambda_4 x}) - \left( \frac{Z t_s j \omega}{w_p \overline{G_s}} \right) (A_2 + B\lambda_3 e^{\lambda_3 x} + C\lambda_4 e^{\lambda_4 x}). \quad (29)$$

Обозначив  $\left( \frac{Z t_s j \omega}{w_p \overline{G_s}} \right) = \frac{1}{\bar{p}}$  величиной  $\bar{p}$  и преобразовав, получаем:

$$u_p = (A_1 + \bar{p}A_2) + A_2x + B(1 + \bar{p}\lambda_3)e^{\lambda_3 x} + C(1 + \bar{p}\lambda_4)e^{\lambda_4 x}. \quad (30)$$

Дифференцируя по переменной  $x$ , можно выразить деформацию ЦТС-пластины как

$$S_p = A_2 + B\lambda_3(1 + \bar{p}\lambda_3)e^{\lambda_3 x} + C\lambda_4(1 + \bar{p}\lambda_4)e^{\lambda_4 x}. \quad (31)$$

При  $x = 0, u = 0$  из уравнения (27) получаем:

$$A_1 = -(B + C). \quad (32)$$

При  $x = 0, u_p = 0$  из уравнения (30) выводим:

$$A_2 = -(B\lambda_3 + C\lambda_4). \quad (33)$$

Подставим уравнение (33) в уравнение (31), получаем:

$$S_p = B[\lambda_3(1 + \bar{n}\lambda_3)e^{\lambda_3 x} - \lambda_3] + C[\lambda_4(1 + \bar{n}\lambda_4)e^{\lambda_4 x} - \lambda_4]. \quad (34)$$

При  $x = +l$  и  $x = -l$  осевая деформация в ЦТС-пластине равна свободной пьезоэлектрической деформации или  $\Lambda$ , благодаря чему из уравнения (34) получаем:

$$B[\lambda_3(1 + \bar{n}\lambda_3)e^{-\lambda_3 l} - \lambda_3] + C[\lambda_4(1 + \bar{n}\lambda_4)e^{-\lambda_4 l} - \lambda_4] = \Lambda, \quad (35)$$

$$B[\lambda_3(1 + \bar{n}\lambda_3)e^{\lambda_3 l} - \lambda_3] + C[\lambda_4(1 + \bar{n}\lambda_4)e^{\lambda_4 l} - \lambda_4] = \Lambda. \quad (36)$$

После решения уравнений (35) и (36) определяются константы  $B$  и  $C$ :

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \frac{\Lambda}{(k_1 k_4 - k_2 k_3)} \begin{bmatrix} k_4 - k_2 \\ k_1 - k_3 \end{bmatrix}, \quad (37)$$

где

$$k_1 = \lambda_3(1 + \bar{n}\lambda_3)e^{-\lambda_3 l} - \lambda_3; \quad (38)$$

$$k_2 = \lambda_4(1 + \bar{n}\lambda_4)e^{-\lambda_4 l} - \lambda_4; \quad (39)$$

$$k_3 = \lambda_3(1 + \bar{n}\lambda_3)e^{\lambda_3 l} - \lambda_3; \quad (40)$$

$$k_4 = \lambda_4(1 + \bar{n}\lambda_4)e^{\lambda_4 l} - \lambda_4. \quad (41)$$

Благодаря толстому связующему слою  $u_{(x=l)} \neq u_{p(x=l)}$ , используя уравнение (17), может быть получено следующее уравнение:

$$\frac{u_{(x=l)}}{u_{p(x=l)}} = \frac{1}{1 - \left( \frac{z t_s j \omega}{w_p \bar{G}_s} \right) \frac{u'_{(x=l)}}{u_{(x=l)}}} = \frac{1}{\left( 1 + \frac{1}{\bar{p}} \frac{u'_0}{u_0} \right)}. \quad (42)$$

Сила, которая направлена на объект, может быть выражена следующим образом:

$$F = -Z u_{(x=l)}; \quad (43)$$

$$F = \frac{-Z}{\left( 1 + \frac{1}{\bar{p}} \frac{u'_0}{u_0} \right)} j \omega u_{p(x=l)} = Z_{eq} j \omega u_{p(x=l)}, \quad (44)$$

где

$$Z_{eq} = \frac{Z}{\left( 1 + \frac{1}{\bar{p}} \frac{u'_0}{u_0} \right)} \quad (45)$$

— «эквивалентный импеданс» с учетом сдвигового запаздывания для одномерного случая.

Схожим образом, «эквивалентный импеданс» с учетом явления сдвигового запаздывания для 2D-модели, основанной на эффективном импедансе, получается как [29]:



$$z_{eff,eq} = \frac{Z_{eff}}{1 + \frac{1}{P_{eff}} \frac{u_{eff}(x=l)}{u_{eff}(x=0)}} \quad (46)$$

### ПРИМАГНИЧИВАЕМЫЙ ЦТС-ДАТЧИК (МЦД)

Для исследования стальных конструкций такой датчик был разработан сравнительно недавно. Он состоит из высокопрочного магнита, листа перспекса (оргстекла), гайки-болта и ЦТС-пластины [30], как показано на рис. 5 и рис. 6. Расположение выполнено таким образом, что ЦТС-пластина

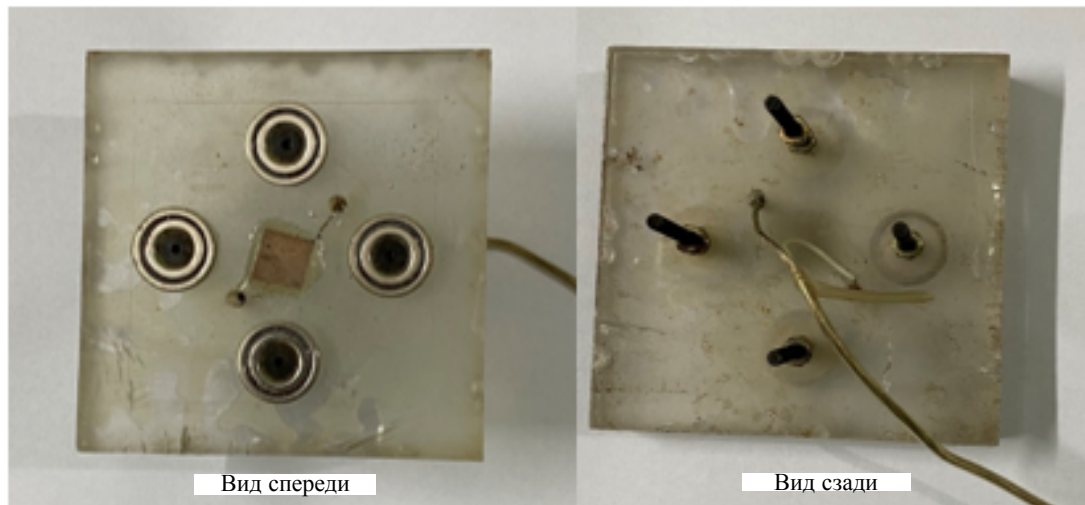


Рис. 5. Вид спереди и вид сзади поверхности примагничиваемого ЦТС-датчика (МЦД).

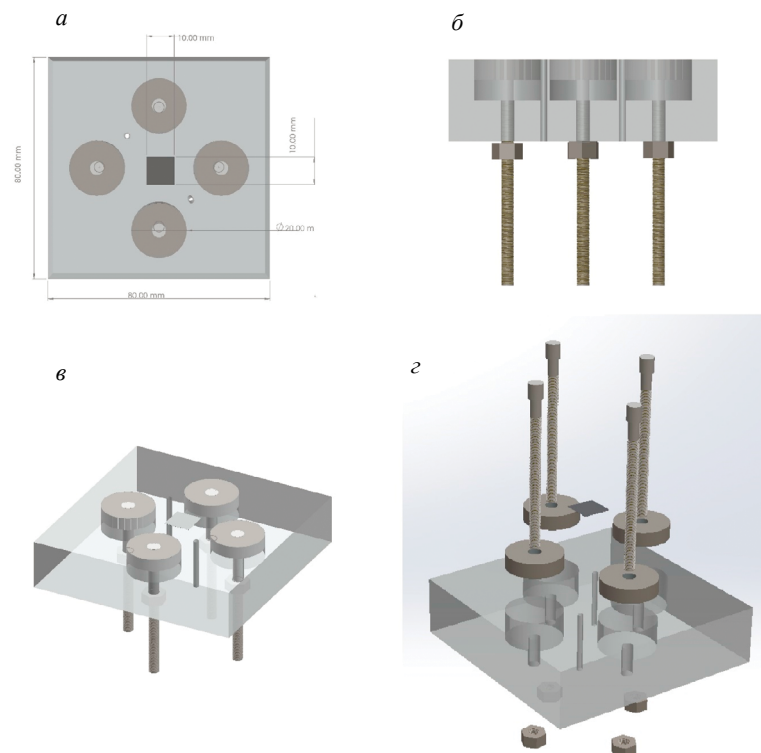


Рис. 6. Модель МЦД: вид сверху (а); вид сбоку (б); изометрическая проекция (в); сборочный чертеж (г).

прикреплена к листу перспекса с помощью клея, а магниты имеют форму круглого диска, закрепленного гайкой и болтом. Они расположены таким образом, что МЦД удерживается на конструкции за счет магнита. ЦТС-пластина находится только в контакте с конструкцией, в то время как магниты левитируют в воздухе. Такое расположение исключает использование эпоксидной смолы или клеящего материала для приклеивания ЦТС-пластины к конструкции. Следовательно, исчезает эффект задержки сдвига, возникающий из-за использования эпоксидной смолы. Этот датчик является хорошим решением для метода ЭМИ, так как для приклеивания ЦТС-пластины в традиционном методе требуется достаточная квалификация, чего нельзя сказать о МЦД. МЦД можно использовать повторно, поскольку его можно легко монтировать и демонтировать на конструкции. В то же время, как при использовании обычного ЦТС-датчика, после того как он приклеен к конструкции, его невозможно отсоединить.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В данном исследовании для эксперимента была взята стальная балка двутаврового сечения достаточно большой длины 5,5 м (как показано на рис. 7, 8), с глубиной полотна, шириной фланца и толщиной 0,140 м, 0,170 м и 0,005 м соответственно. Балка находилась в состоянии простой опоры, размещаясь на бетонных блоках без боковых сил, действующих на нее. ЦТС- датчики были

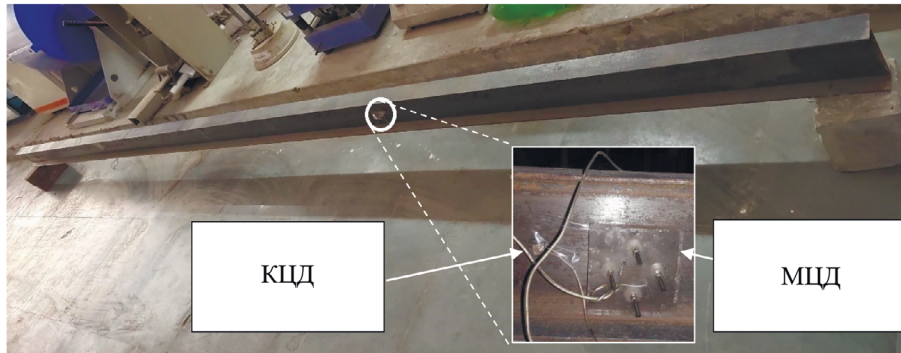


Рис. 7. Стальная двутавровая балка длиной 5.5 м.

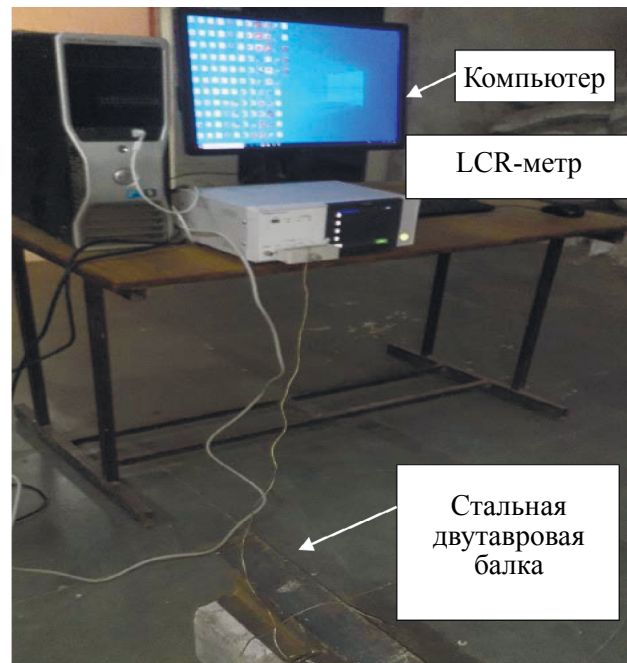


Рис. 8. Экспериментальная установка.

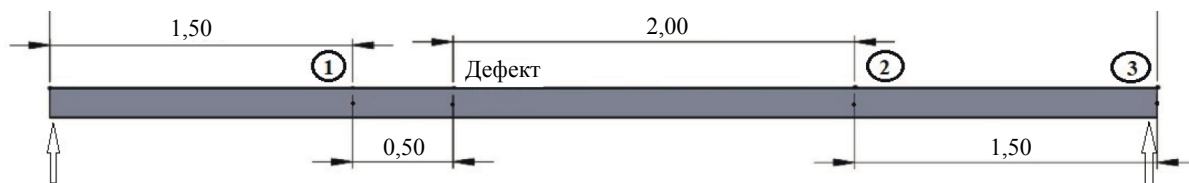


Рис. 9. Положение датчика и дефекта.

приклеены в местах 1, 2 и 3 (как показано на рис. 9), в тех же местах также были размещены МЦД. Повреждения были сделаны в балке с помощью фрезы, стадия повреждения 1 изображает срез фланца на глубину 0,040 м, для стадии повреждения 2 глубина была увеличена до стыка полотна и фланца. На стадии повреждения 3 обе стороны фланца были срезаны на глубину 0,040 м, а на стадии повреждения 4 эта работа продолжалась до соединения полотна и фланца. Заключительный этап повреждения 5 был выполнен в части полотна балки, разрез был выполнен до середины полотна, все повреждения показаны на рис. 10.

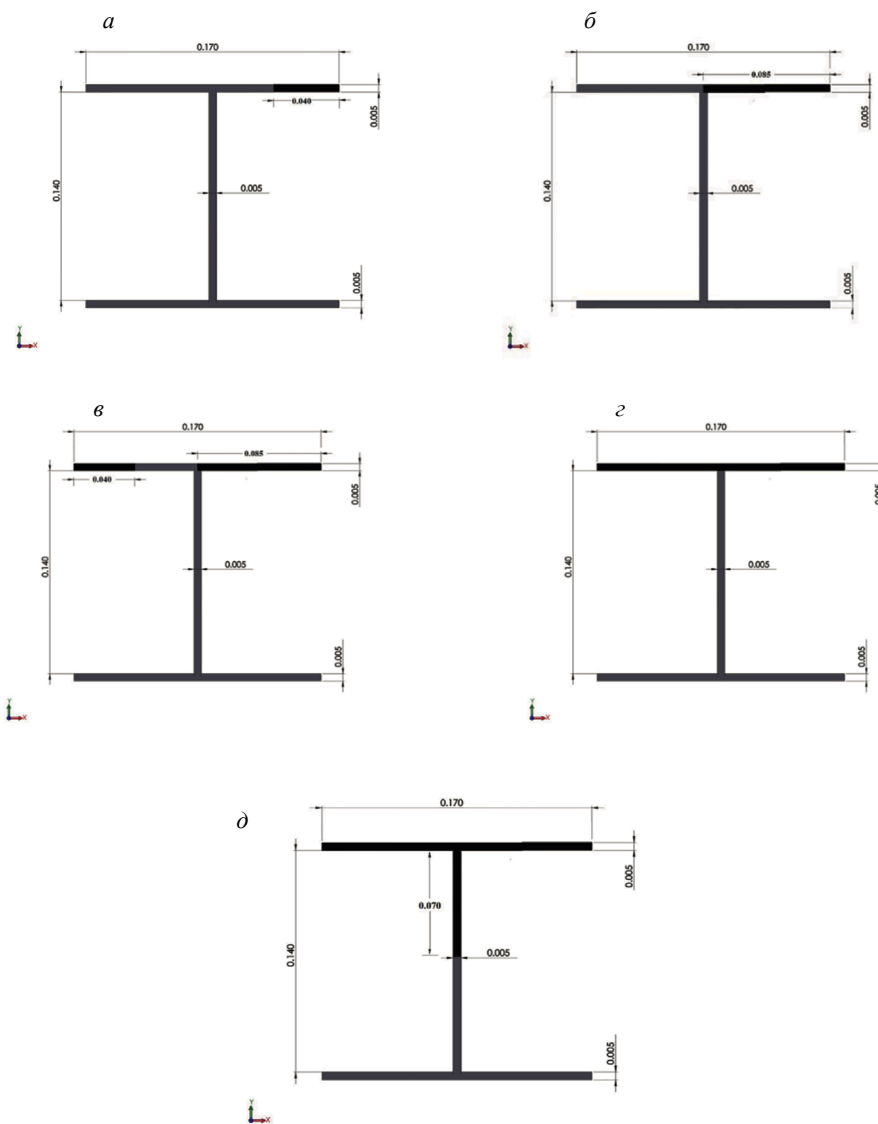


Рис. 10. Стадии создания дефекта: стадия 1 (а); стадия 2 (б); стадия 3 (в); стадия 4 (г); стадия 5 (д).

Для применения метода ЭМИ требуется следующее оборудование: LCR-метр Hioki IM3536 и персональный компьютер (установка показана на рис. 8). ЦТС-пластина возбуждается при помощи LCR-метра, затем эти ЦТС-пластины создают волны напряжения в конструкциях, которые возвращаются от границ или дефектов, присутствующих в деталях конструкции, обратно к ЦТС-пластине. Затем сигналы регистрируются с помощью LCR-метра в виде проводимости с изменяющейся частотой. Первое показание измерялось на начальной стадии, а затем после создания повреждений в конструкции. Эта операция была повторена для всех конфигураций датчиков, то есть для КЦД и МЦД. Все графики зависимости проводимости от частоты показаны на рис. 11—16.

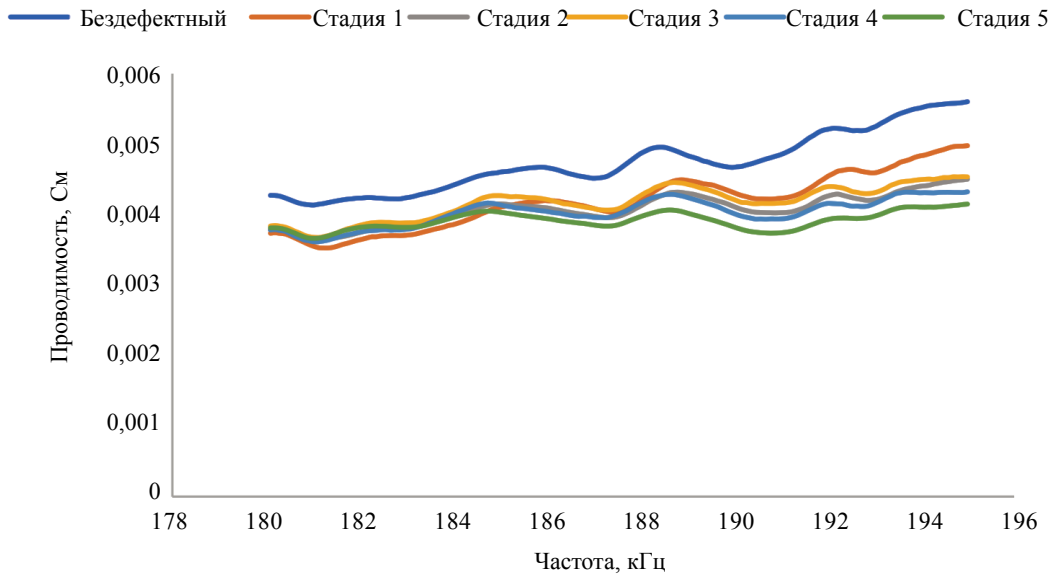


Рис. 11. Зависимость проводимости от частоты для МЦД в положении 1.

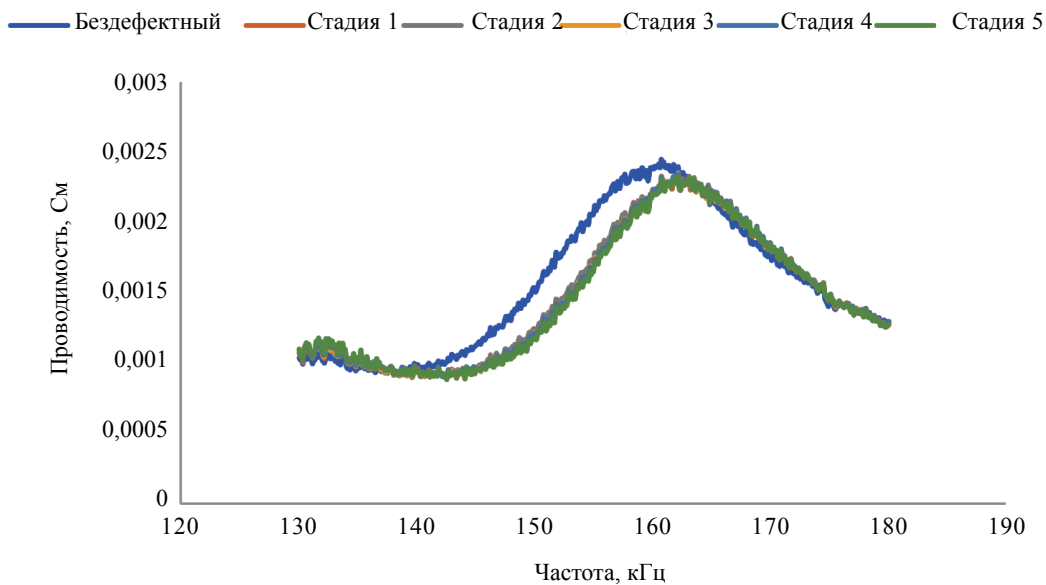


Рис. 12. Зависимость проводимости от частоты для КЦД в положении 1.

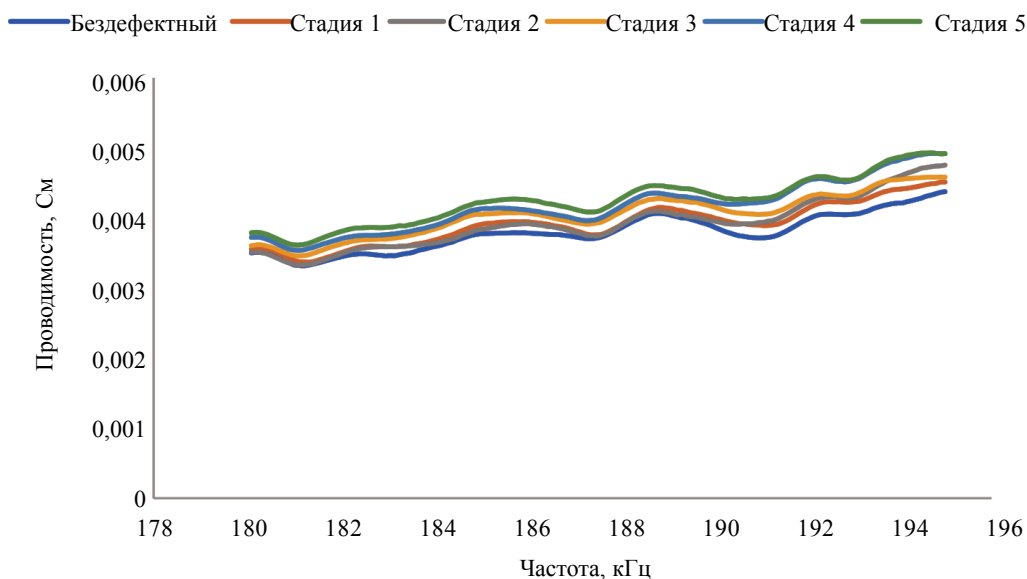


Рис. 13. Зависимость проводимости от частоты для МЦД в положении 2.

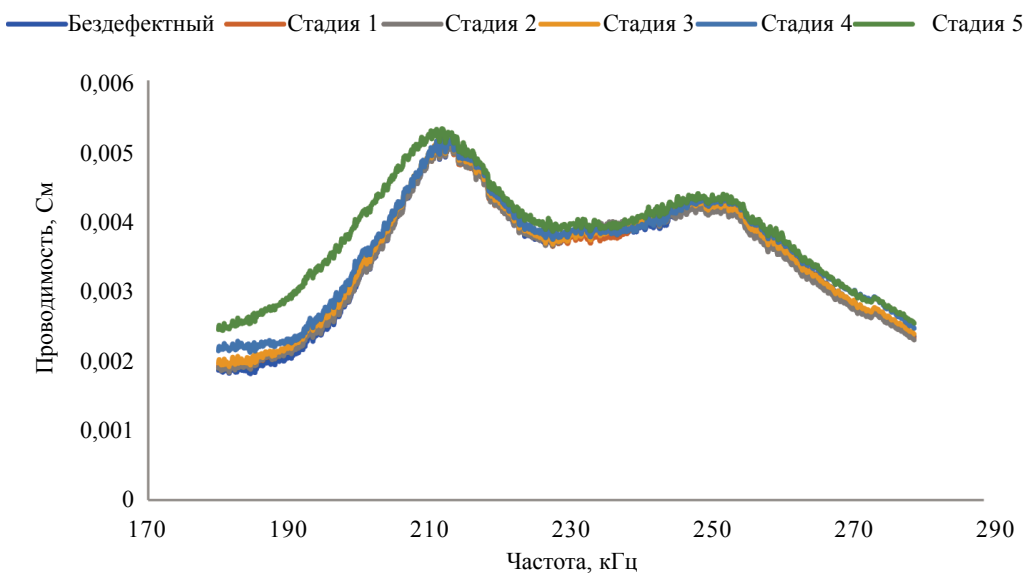


Рис. 14. Зависимость проводимости от частоты для КЦД в положении 2.

### КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ПОВРЕЖДЕНИЙ

Среднее квадратическое отклонение (СКО) используется для расчета разницы в значениях между исходным значением характеристики адмиттанса и при каждом из пяти состояний повреждения. СКО используют в качестве признака повреждения для количественной оценки изменений в характеристиках адмиттанса в процессе развития повреждения:

$$СКО = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (G_i^1 - G_i^0)^2}{\sum_{i=1}^n (G_i^0)^2}} \times 100, \quad (46)$$

где  $G_i^1$  — величина проводимости после создания в объекте  $i$ -го дефекта и  $G_i^0$  — проводимость объекта в исходном состоянии,  $n$  обозначает количество измерений.

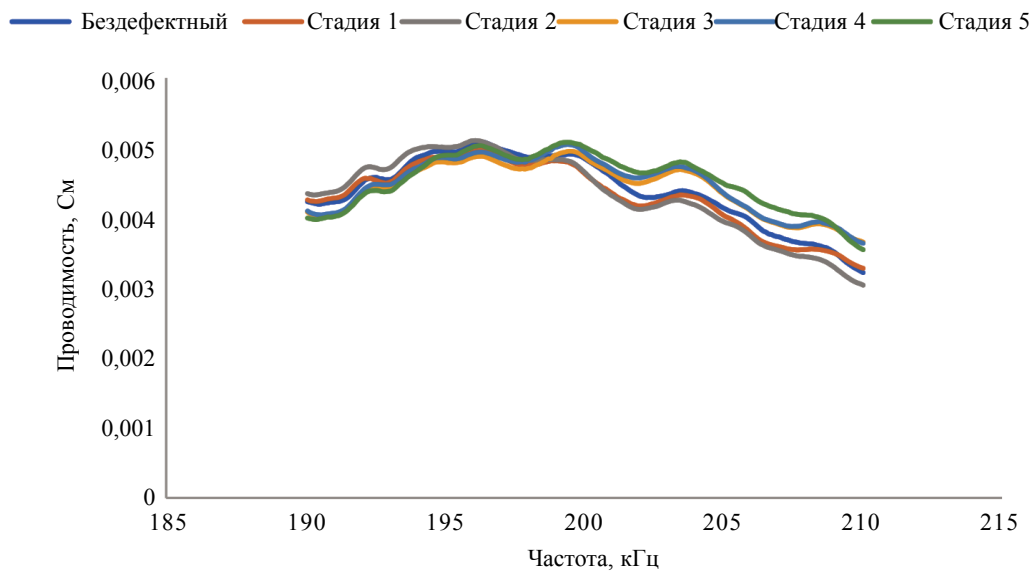


Рис. 15. Зависимость проводимости от частоты для МЦД в положении 3.

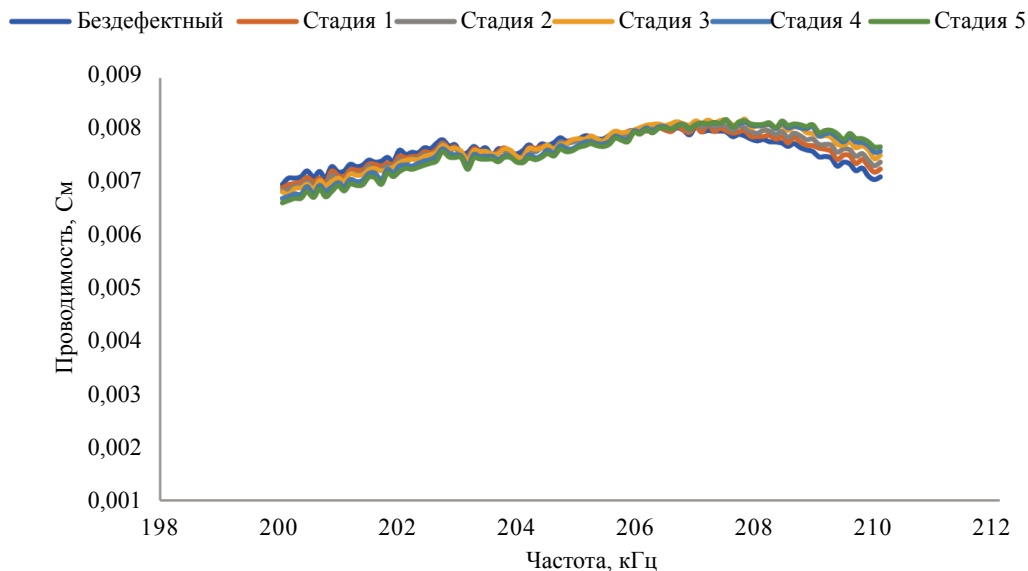


Рис. 16. Зависимость проводимости от частоты для КЦД в положении 3.

Обнаружение дефектов с помощью МЦД оказывается более надежным по сравнению с КЦД, так как значения СКО во всех случаях оказываются выше. В точке 1 рассматриваемый диапазон частот КЦД составляет 180—195 кГц, а для МЦД рассматриваемый диапазон частот составляет 130—180 кГц, сравнение гистограммы СКО показано на рис. 17. В точке 1, которая находится на расстоянии 0,5 м от места дефекта, изменения в характеристиках ЭМИ больше, что отражено на гистограмме СКО. Начальный уровень повреждений легко обнаруживается методом ЭМИ, при дальнейшем увеличении степени повреждения значение СКО увеличивается не так сильно. Для точки 2 диапазон частот КЦД составляет 180—195 кГц, а для МЦД — 185—280 кГц, сравнение гистограмм СКО показано на рис. 18. В точке 2, которая находится на расстоянии 2 м от места дефекта, значение СКО уменьшается для МЦД и КЦД по сравнению с показаниями датчиков в точке 1. В точке 3 диапазон частот КЦД составляет 190—210 кГц, а диапазон частот МЦД—200—210 кГц, сравнение гистограмм СКО показано на рис. 19. Аналогично для точки 3, которая находится на расстоянии 3,5 м от места дефекта, значения СКО датчика уменьшаются

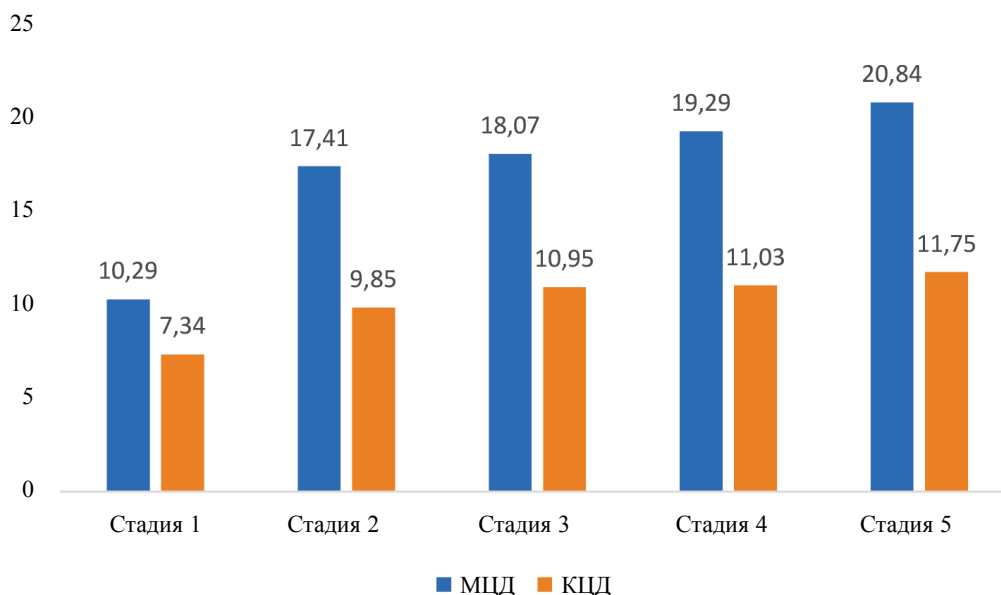


Рис. 17. SKO для обоих датчиков в положении 1 при наличии дефекта.

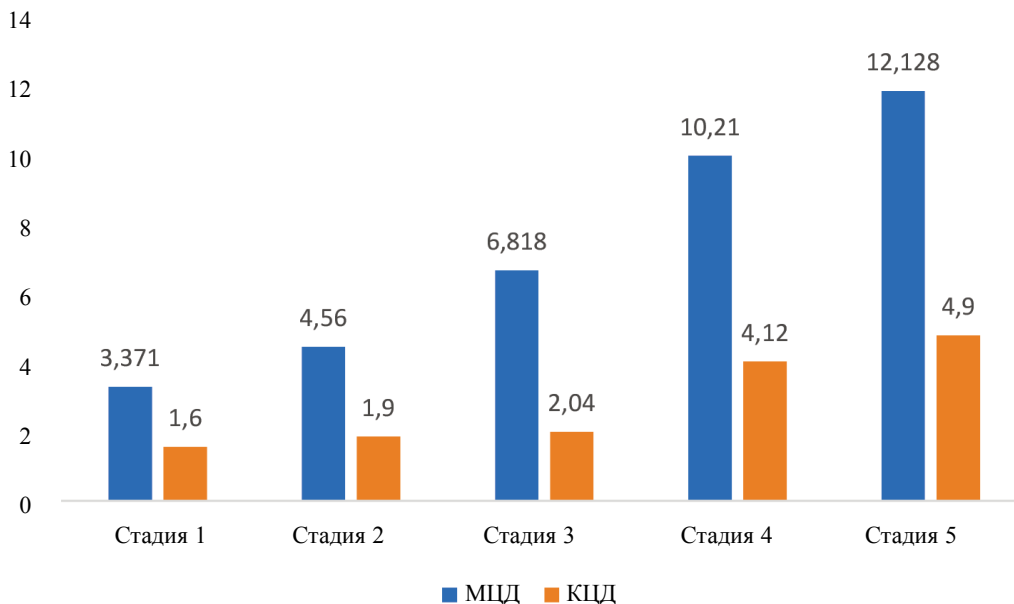


Рис. 18. SKO для обоих датчиков в положении 2 при наличии дефекта.

по сравнению с датчиками, установленными в точках 1 и 2. По мере увеличения расстояния от места дефекта чувствительность датчика снижается, а для КЦД она снижается еще больше из-за эффекта сдвигового запаздывания. В этом случае между датчиком и объектом не происходит полной передачи деформации. В случае КЦД чувствительность снижается в точках 2 и 3 гораздо сильнее, поэтому для обнаружения повреждений с помощью КЦД датчик должен быть прикреплен не ближе 2 м от места повреждения. В то же время, как и в случае МЦД, чувствительность датчика снижается незначительно, поэтому его можно использовать на расстоянии до 3,5 м от места дефекта.

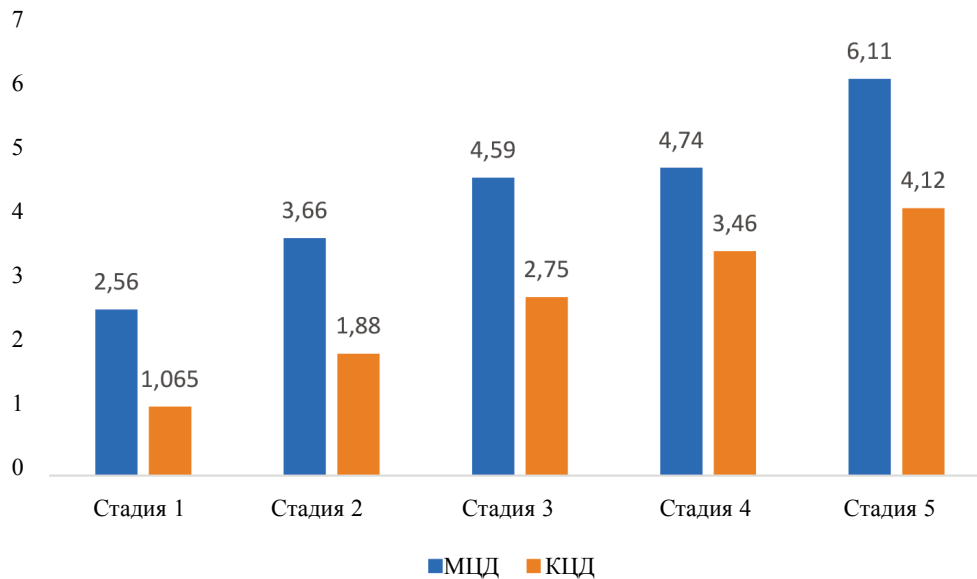


Рис. 19. СКО для обоих датчиков в положении 3 при наличии дефекта.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В методе ЭМИ исследователями были предложены различные датчики. Они имеют свои преимущества и недостатки. В данной работе сравниваются эффективность и диапазон чувствительности КЦД и МЦД. Эффективность МЦД выше, чем КЦД, из-за отсутствия эпоксидного слоя между ЦТС-пластиной и конструкцией. Из-за эпоксидного слоя в КЦД возникает эффект задержки сдвига, деформация, передаваемая ЦТС-пластиной на объект контроля и обратно, уменьшается. Область чувствительности МЦД достигает 3,5 м, в то время как область чувствительности КЦД составляет менее 2,0 м при контроле стальной балки.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kostin V., Vasilenko O., Filatenkov D. Y., Chekasina Y. A., Serbin E.* Magnetic and magnetoacoustic testing parameters of the stressed-strained state of carbon steels that were subjected to a cold plastic deformation and annealing // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2015. V. 51. No. 10. P. 624—632.
2. *Kostin V., Nichipuruk A., Nikolaeva L., Sokolova S., Smorodinskii Y. G., Vasilenko O.* Magnetic testing of hardness of cast railcar steel 32X06Л after quenching and high-temperature tempering // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2016. V. 52. No. 12. P. 716—721.
3. *Kostin V., Vasilenko O., Mikhailov A., Lukinykh N., Ksenofontov D.* On the advantages of local measurement of coercive force of ferromagnetic objects based on internal field // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2020. V. 56. No. 7. P. 574—580.
4. *Bhalla S., Soh C. K.* Electromechanical impedance modeling for adhesively bonded piezo-transducers // *Journal of intelligent material systems and structures*. 2004. V. 15. No. 12. P. 955—972.
5. *Crawley E.F., De Luis J.* Use of piezoelectric actuators as elements of intelligent structures // *AIAA Journal*. 1987. V. 25. No. 10. P. 1373—1385.
6. *Sirohi J., Chopra I.* Fundamental understanding of piezoelectric strain sensors // *Journal of intelligent material systems and structures*. 2000. V. 11. No. 4. P. 246—257.
7. *Yang Y., Divsholi B.S., Soh C.K.* A reusable PZT transducer for monitoring initial hydration and structural health of concrete // *Sensors*. 2010. V. 10. No. 5. P. 5193—5208.
8. *Tawie R., Lee H.-K.* Characterization of cement-based materials using a reusable piezoelectric impedance-based sensor // *Smart Materials and Structures*. 2011. V. 20. No. 8. P. 085023.
9. *Quinn W., Kelly G., Barrett J.* Development of an embedded wireless sensing system for the monitoring of concrete // *Structural Health Monitoring*. 2012. V. 11. No. 4. P. 381—392.
10. *Kim J., Kim J.-W., Park S.* Early-age concrete strength estimation technique using embedded piezoelectric self-sensing impedance / In *EWSHM-7th European workshop on structural health monitoring*, 2014. Inria.



11. *Lu X., Lim Y.Y., Soh C.K.* Investigating the performance of «Smart Probe» based indirect EMI technique for strength development monitoring of cementitious materials—Modelling and parametric study // *Construction and Building Materials*. 2018. V. 172. P. 134—152.
12. *Liu P., Hu Y., Chen Y., Geng B., Xu D.* Investigation of novel embedded piezoelectric ultrasonic transducers on crack and corrosion monitoring of steel bar // *Construction and Building Materials*. 2020. V. 235. P. 117495.
13. *Pan H. H., Huang M.-W.* Piezoelectric cement sensor-based electromechanical impedance technique for the strength monitoring of cement mortar // *Construction and Building Materials*. 2020. V. 254. P. 119307.
14. *Wang D., Zhu H.* Monitoring of the strength gain of concrete using embedded PZT impedance transducer // *Construction and Building Materials*. 2011. V. 25. No. 9. P. 3703—3708.
15. *Na S., Lee H.-K.* A multi-sensing electromechanical impedance method for non-destructive evaluation of metallic structures // *Smart materials and structures*. 2013. V. 22. No. 9. P. 095011.
16. *Wang T., Wei D., Shao J., Li Y., Song G.* Structural stress monitoring based on piezoelectric impedance frequency shift // *Journal of Aerospace Engineering*. 2018. V. 31. No. 6. P. 04018092.
17. *Priya C.B., Saravanan T.J., Balamonica K., Gopalakrishnan N., Rao A.R.M.* EMI based monitoring of early-age characteristics of concrete and comparison of serial/parallel multi-sensing technique // *Construction and Building Materials*. 2018. V. 191. P. 1268—1284.
18. *Moharana S., Bhalla S.* Development and evaluation of an external reusable piezo-based concrete hydration-monitoring sensor // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2019. V. 30. No. 18—19. P. 2770—2788.
19. *Chen D., Huo L., Song G.* EMI based multi-bolt looseness detection using series/parallel multi-sensing technique // *Smart Struct. Syst.* 2020. V. 25. P. 423—432.
20. *Kocherla A., Subramaniam K.V.* Embedded electrical impedance-based PZT sensor for monitoring hydrating concrete: development and evaluation // *Smart Materials and Structures*. 2020. V. 29. No. 5. P. 055038.
21. *Negi P., Chhabra R., Kaur N., Bhalla S.* Health monitoring of reinforced concrete structures under impact using multiple piezo-based configurations // *Construction and Building Materials*. 2019. V. 222. P. 371—389.
22. *Li W., Wang J., Liu T., Luo M.* Electromechanical impedance instrumented circular piezoelectric-metal transducer for corrosion monitoring: modeling and validation // *Smart Materials and Structures*. 2020. V. 29. No. 3. P. 035008.
23. *Li L., Xia Y., Chen G.* Experimental and numerical studies of debonding monitoring of FRP shear-strengthened beams using EMI technique // *Journal of Aerospace Engineering*. 2018. V. 31. No. 5. P. 04018048.
24. *Liang Y., Li D., Parvasi S. M., Kong Q., Song G.* Bond-slip detection of concrete-encased composite structure using electro-mechanical impedance technique // *Smart Materials and Structures*. 2016. V. 25. No. 9. P. 095003.
25. *Fan S., Li W., Kong Q., Feng Q., Song G.* Monitoring of pin connection loosening using electromechanical impedance: Numerical simulation with experimental verification // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2018. V. 29. No. 9. P. 1964—1973.
26. *Guo B., Chen D., Huo L., Song G.* Monitoring of grouting compactness in tendon duct using multi-sensing electro-mechanical impedance method // *Applied Sciences*. 2020. V. 10. No. 6. P. 2018.
27. *Shanker R., Bhalla S., Gupta A., Praveen Kumar M.* Dual use of PZT patches as sensors in global dynamic and local electromechanical impedance techniques for structural health monitoring // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2011. V. 22. No. 16. P. 1841—1856.
28. *Liang C., Sun F.P., Rogers C.A.* Coupled electro-mechanical analysis of adaptive material systems—determination of the actuator power consumption and system energy transfer // *Journal of intelligent material systems and structures*. 1997. V. 8. No. 4. P. 335—343.
29. *Bhalla S., Soh C. K.* Electromechanical impedance modeling for adhesively bonded piezo-transducers // *Journal of intelligent material systems and structures*. 2004. V. 15. No. 12. P. 955—972.
30. PI Ceramic 2021 Product Information Catalogue (Germany: Lindenstrabe) <http://www.piceramic.com>