

В. П. ЛУНИН, д-р техн. наук, проф.

Д. Ю. АРХАРОВ

Д. В. ЗИНОВКИН

Национальный исследовательский университет «МЭИ» (Москва, РФ)

РАЗРАБОТКА ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ФЕРРОМАГНИТНОЙ АРМАТУРЫ В БЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Аннотация

Обнаружение арматуры, а также наличие дефектов в арматурных конструкциях вихретоковым методом определяется по изменению индуктивности многовитковой катушки в составе измерительного устройства от присутствующего вблизи контролируемого ферромагнитного изделия. Проведен ряд численных (на трехмерных конечно-элементных моделях) исследований влияния на индуктивность преобразователя базовой и модернизированных конструкций потенциального варианта арматурного стержня, что позволило оценить влияние толщины бетонного слоя (зазора) и ориентации используемого стального стержня, а также обосновать выбор некоторых параметров спроектированного преобразователя, влияющих на результат в ходе выполнения контроля.

Ключевые слова: Ферромагнитные арматурные стержни в бетоне, вихретоковый преобразователь, конечно-элементная модель

Введение. Неразрушающий контроль состояния ферромагнитных арматурных конструкций бетонных структур имеет важное значение в строительной отрасли. Вихретоковый (ВТ) метод может быть использован для инспектирования арматурных стержней, где дефекты, вызванные коррозией металла, как правило, проявляются либо в виде уменьшения диаметра стержня, либо его разрыва. ВТ метод является классическим методом контроля, который использует гармоническое возбуждение тока фиксированной частоты в катушке, что вызывает квазистационарный электромагнитный процесс возникновения вихревых токов в находящемся вблизи контролируемом электропроводящем изделии, который влечет за собой, в частности, изменение индуктивности самой катушки. Регистрируемое изменение индуктивности зависит как от электрофизических и геометрических параметров катушки и контролируемого изделия, так и от дефектов различных форм и размеров, которые могут быть в этом изделии. Такие дефекты трудно обнаружить с помощью традиционных методов, таких как ультразвуковой из-за большого затухания ультразвуковой волны в бетоне [1].

Цель работы - доказать принципиальную возможность использования вихретокового метода для контроля качества армирования бетонных конструкций. Для достижения цели предполагалось:

- выбрать базовую конструкцию вихретокового преобразователя, наиболее подходящую для решения задачи, определить информативный параметр контроля;

- создать трехмерную конечно-элементную модель преобразователя в программе COMSOL Multiphysics;

- модернизация 2: катушка, ферритовый корпус и алюминиевый экран. - предложить и исследовать на 3D модели варианты модернизации базовой конструкции с использованием способов концентрации магнитного поля и экранирования;

- предложить способ выявления дефектов арматуры железобетонных конструкций, таких как коррозия и разрыв;

- выявить и исследовать влияние основных геометрических мешающих факторов на индуктивность;

- предложить электрическую схему измерительного устройства для регистрации малых изменений индуктивности.

Объект контроля – арматурные стержни в бетоне. В программном комплексе COMSOL Multiphysics была разработана конечно-элементная модель изучаемого электромагнитного явления с использованием модуля физики магнитных полей (Magnetic Fields). Решение выполнялось в частотной области (Frequency Domain). В соответствии с ГОСТ 22904 – 93 [2], размер защитного слоя бетона должен быть не менее 1-3 диаметра арматуры, который составляет от 12 до 32 мм. Для исследований диаметр стержня был выбран 20 мм, слой бетона 60 мм.

В работе была использована трехмерная (3D) модель с учетом зависимости от геометрии катушки и контролируемого ферромагнитного стержня, а также формы и положения коррозии (утонения стержня) и/или его разрыва относительно преобразователя. На рисунке 1 (элементы 3 и 4) показана выбранная базовая конструкция проектируемого преобразователя [3], состоящая из многовитковой катушки вытянутой (прямоугольной) формы с соотношением сторон 3:1, и объект контроля – арматурный стержень, находящийся на некотором расстоянии (имитация слоя электронепроводящего бетона) от нее.

Исследование вариантов модернизации базовой конструкции с использованием способов концентрации магнитного поля и экранирования (рис. 2). Рассмотрены и исследованы модели трех вариантов модернизации базового преобразователя:

- одна многовитковая катушка;

- модернизация 1: катушка и ферритовый корпус;

- модернизация 2: катушка, ферритовый корпус и алюминиевый экран.

Результатом численного анализа каждый раз является распределение индукции магнитного поля во всей расчетной области, в том числе, как на поверхности, так и внутри как самой катушки, ферритового сердечника, алюминиевого корпуса, так и контролируемого цилиндрического стержня, характеризуя возникающие вихревые токи в приповерхностном слое с учетом

скин-эффекта. Подобные распределения были получены для всех вариантов реализации конструкции.

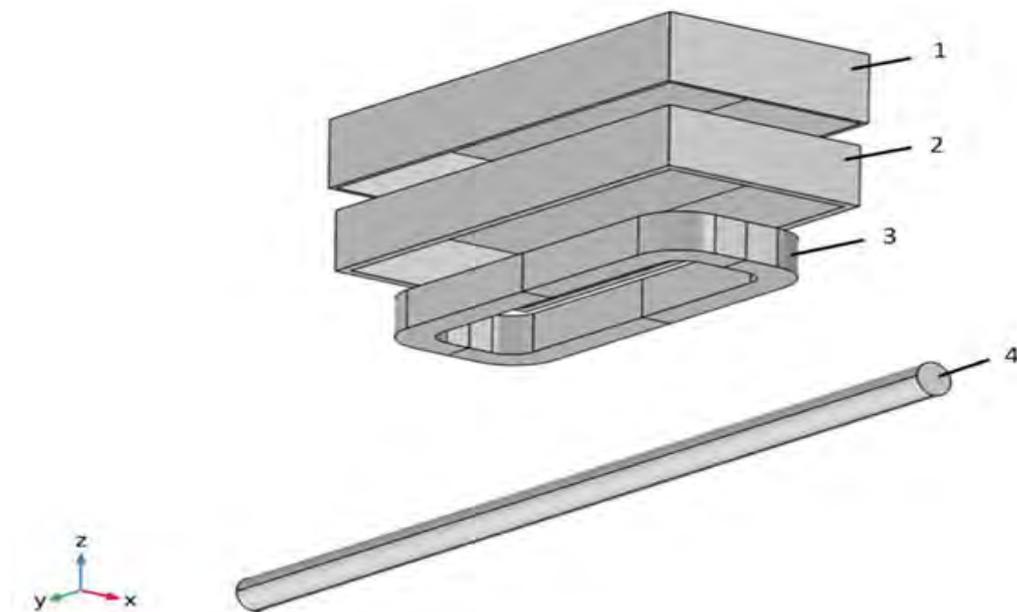


Рис. 1 Общий вид геометрии исследуемой конструкции в условно разобранном виде (для наглядности): 1 – алюминиевый корпус; 2 – ферритовый корпус; 3 – катушка возбуждения; 4 – арматурный стержень

Сравнение значений полученной индуктивности разных конструкций проведено в таблице 1. Наличие ферромагнитного корпуса значительно увеличило индуктивность системы, однако добавление алюминиевого экрана (для экранирования катушки от внешних электромагнитных полей) несколько снизило значение индуктивности. Тем не менее, именно 3-ий вариант конструкции был задействован в дальнейших расчетах.

Табл. 1 Значения информативного параметра (индуктивности) конструкций

Частота возбуждения, F , кГц	Исходная индуктивность катушки L , мГн	Индуктивность с ферритовым корпусом L , мГн	Индуктивность с ферритовым и алюминиевым корпусами L , мГн
8	69,601	125,568	122,881

Выявление дефектов арматуры железобетонных конструкций. На рисунке 2 приведены результаты расчета изменения (уменьшения) индуктивности от влияния потери сечения арматурного стержня, начиная с 10%, затем 20%, 40%, 60% и 100% (полный разрыв) и его протяженности от 0 до 140 мм с интервалом 20 и 40 мм.

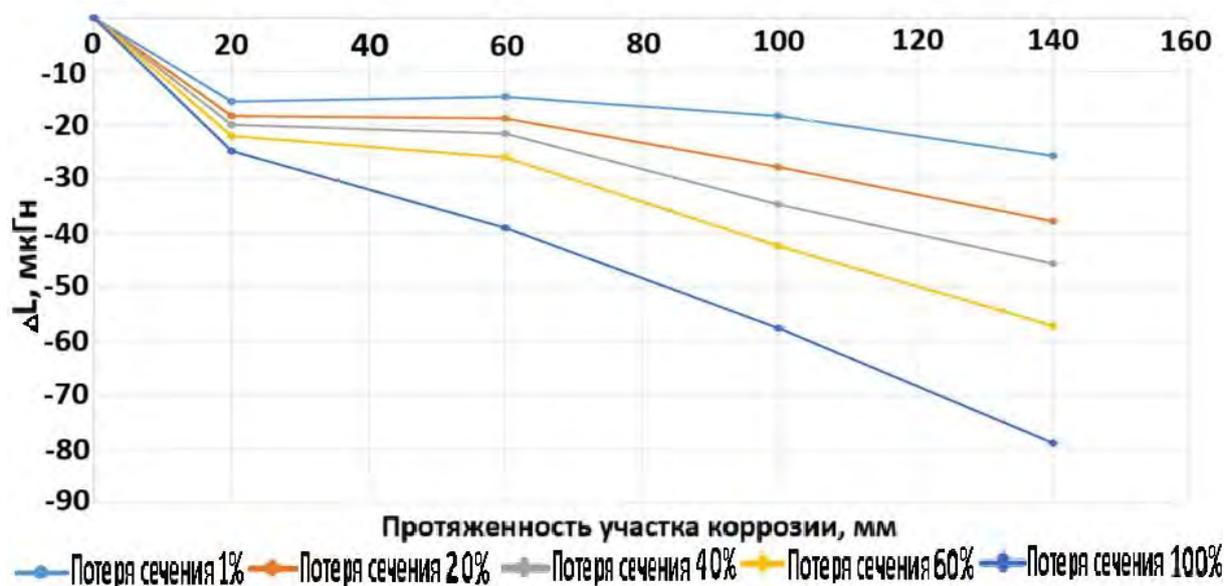


Рис. 2 Рассчитанные значения изменения индуктивности при разных уровнях утонения диаметра стержня и его протяженности

Геометрические факторы, влияющие на точность оценки индуктивности, включают (рис. 3):

- расстояние арматуры от катушки – имитация неравномерности толщины бетонного слоя, возникающая вследствие выдавливания или изгиба опалубки при заливке (см. рис. 3, левый верхний и правый нижний);

- поворот стержня арматуры относительно Z координаты – имитация несоосной установки катушки по отношению к ориентации арматурного стержня (см. рис. 3, правый верхний);

- поворот арматуры относительно X координаты – имитация выпуклостей бетонной поверхности (рис. 3, левый нижний).

Результаты численных экспериментов с оценкой влияния положения стержня относительно преобразователя сведены в таблицу 2.

Табл. 2 Изменение индуктивности от расстояния и углов наклона стержня

Расстояние H_z , мм	ΔL , мкГн	Угол поворота φ_x , °	ΔL , мкГн	Угол поворота φ_z , °	ΔL , мкГн
50	- 30,807	0	0	0	0
55	- 23,194	2	- 0,695	2	- 0,137
60	0	4	0,195	4	- 1,433
65	32,652	6	2,158	6	- 0,928
70	84,351	8	3,446	8	- 0,925
		10	5,600	10	- 0,786

Электрическая схема измерительного устройства. Вихретоковый преобразователь включается в электрическую RLC - схему (рис. 4), где L_c и R_c – индуктивность и сопротивление многовитковой катушки, R_e – сопротивление

дополнительного (настроечного) сопротивления, а C_c – емкость внешнего конденсатора, включенного последовательно с катушкой.

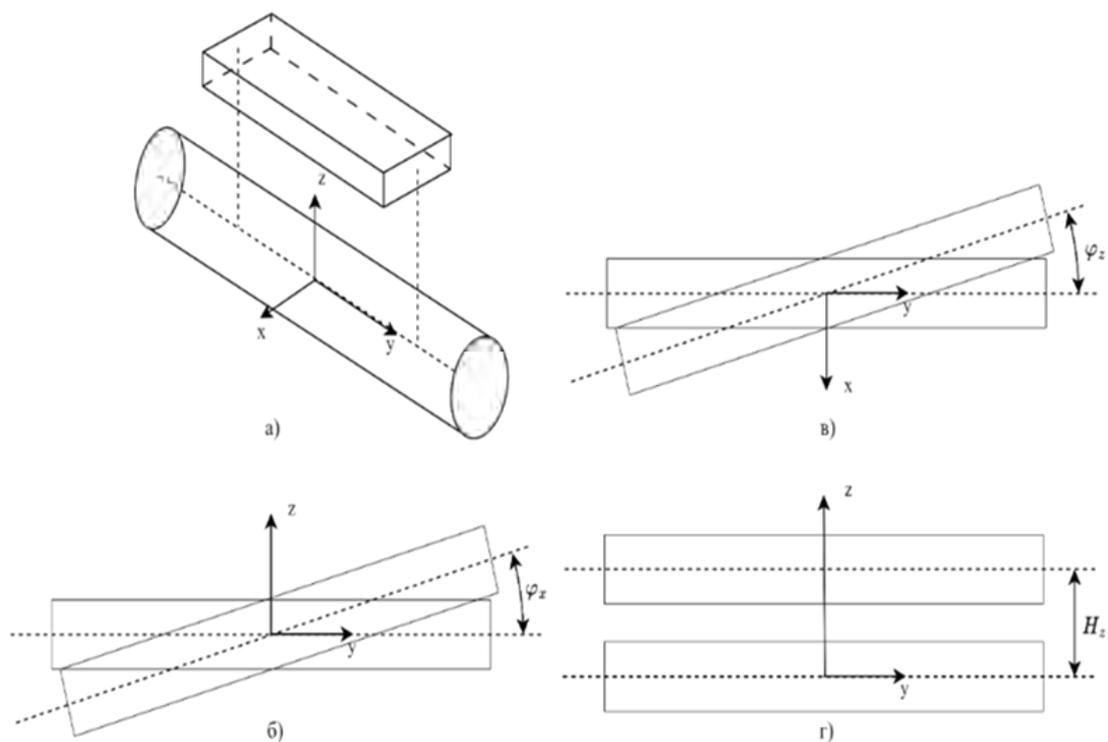


Рис. 3 Геометрия изменений в положении арматуры: а) – общий вид; б) – кручение по оси X; в) – кручение по оси Z; г) – перемещение вдоль оси Z.

В данной схеме V_{source} – это напряжение, подаваемое на вход схемы, а V_c – напряжение, измеренное на конденсаторе.

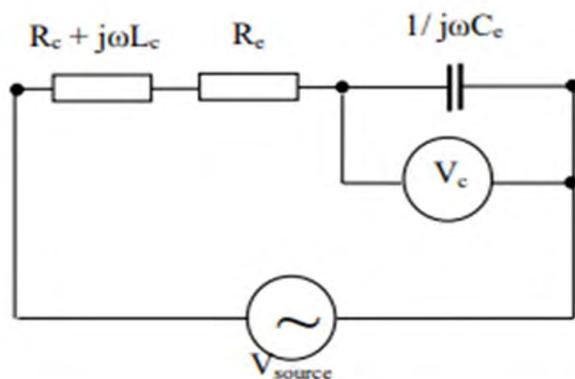


Рис. 4 Электрическая схема измерительного устройства

Изменение индуктивности регистрируется соответствующим изменением напряжения на конденсаторе электрической схемы. Настройку схемы на резонанс добиваются установкой соответствующей емкости конденсатора при исходной индуктивности катушки в отсутствии контролируемого образца. Для обеспечения оптимальной чувствительности необходимо, чтобы при настройке

рабочая точка находилась правее (или левее) резонансной точки для предполагаемого диапазона изменения индуктивности, в точке максимальной производной.

Выводы. Продемонстрирована принципиальная возможность использования вихретокового преобразователя для контроля качества армирования бетонных конструкций. Была предложена конструкция преобразователя, включающая, помимо катушки, экранирующий и ферритовый корпуса. В работе был предложен способ выявления дефектов арматуры железобетонных конструкций, таких как коррозия и разрыв. В ходе моделирования были выявлены основные влияющие факторы. Для регистрации изменений индуктивности была предложена электрическая схема измерительного устройства и способ ее настройки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Качанов В.К., Соколов И.В. Акустический импакт-эхо метод и прибор для диагностики зданий и сооружений из бетона толщиной более 2-х метров / В.К. Качанов, И.В. Соколов. - ФГБОУ ВО «НИУ –МЭИ», каф. ЭиН, 2018.

2. ГОСТ 22904-93. Конструкции железобетонные. Термины и определения: принят Межгосударственной научно-технической комиссией по стандартизации и техническому нормированию в строительстве (МНТКС) 10 ноября 1993 г.: дата введения 1995-01-01. – URL: [https:// docs.cntd.ru/document/1200000043](https://docs.cntd.ru/document/1200000043) (дата обращения 07.06.2024).

3. Naasson P. de Alcantara Jr., Luiz Gonçalves Jr. Simulation of an ECT Sensor to Inspect the Reinforcement of Concrete Structures / P. Naasson, Jr. de Alcantara, Jr. Luiz Gonçalves.- São Paulo State University – Unesp. Department of Electrical Engineering 2015, 6.

Контакты:

LuninVP@mpei.ru (Лунин Валерий Павлович)

ArkharovDY@mpei.ru (Архаров Дмитрий Юрьевич)

ZinovkinDV@mpei.ru (Зиновкин Дмитрий Владимирович)