

И. М. БОГОТОВ

А. К. ШЕПЕЛЕВ

В. П. ЛУНИН, *д-р техн. наук, проф.*

Национальный исследовательский университет «МЭИ» (Москва, Россия)

ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В ОЦЕНКЕ СТЕПЕНИ КОРРОЗИОННОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ АРМАТУРЫ В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Аннотация. Представлены результаты модельных исследований преобразователя специальной формы для мониторинга коррозионного состояния стальных стержней в железобетонных конструкциях с использованием вихретокового метода. Для исследования была построена строгая трехмерная конечно-элементная модель многовитковой катушки, интегрированной в резонансную RLC-цепь. Численный анализ был сосредоточен преимущественно на двух контролируемых ключевых параметрах в области резонанса: эффективном сопротивлении R_{eff} и эффективной индуктивности L_{eff} системы «катушка – ферромагнитный стержень», которые продемонстрировали устойчивую зависимость от степени коррозионного повреждения. Результаты исследований подтвердили высокую чувствительность разработанной схемы контроля к изменениям состояния арматуры, что позволяет не только обнаруживать наличие коррозии, но и количественно оценивать степень повреждения. Это подтверждает перспективность предлагаемого метода для эффективного контроля железобетонных конструкций без нарушения целостности защитного бетонного слоя.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, корродированные арматурные стержни, вихретоковый контроль, резонансная RLC - цепь

Введение

Железобетонные конструкции, широко применяемые при возведении мостов, зданий и других объектов гражданской инфраструктуры, подвержены коррозии стальной арматуры, что может существенно снизить их несущую способность и эксплуатационную надежность. Своевременный и точный контроль состояния этой арматуры является критически важным условием обеспечения долговечности таких сооружений [1]. Один из электромагнитных методов контроля, вихретоковый, может быть успешно использован для инспектирования арматурных стержней, где дефекты, вызванные коррозией металла, как правило, проявляются либо в виде уменьшения диаметра стержня, либо его разрыва. Этот метод 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 комплексного сопротивления (индуктивности и резистивности) самой катушки. Регистрируемое изменение этого сопротивления 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].

Настоящая работа посвящена исследованию на трёхмерной конечно-элементной модели распределения электромагнитного поля, создаваемого вихретоковой катушкой в присутствии ферромагнитного арматурного стержня, при этом сама катушка интегрируется в настраиваемую резонансную электрическую цепь, а доступные для измерения изменяемые параметры которой позволяют оценивать степень коррозии арматурного стержня, в частности, потерю его сечения и разрыв.

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 информативные параметры контроля; создать трехмерную конечно-элементную модель преобразователя в программе COMSOL Multiphysics; предложить электрическую схему измерительного устройства для регистрации малых изменений параметров индуктивной катушки; предложить способ выявления и оценивания дефектов арматуры железобетонных конструкций, таких как коррозия.

1. Объект исследования и параметры модели

Объектом исследования являются отдельные стержневые элементы арматуры класса А-V (А800) (марка стали 23Х2Г2Т с электрической проводимостью 6 МСм / м и магнитной проницаемостью 200), рассмотрены два типовых диаметра стержней – 12 мм и 20 мм. Диаметр 12 мм характерен для армирования плит перекрытий и лёгких балок, а 20 мм применяется в колоннах, ригелях и других массивных несущих элементах [2].

Для изучения влияния коррозии на электрические характеристики системы «катушка – арматурный стержень» использован метод конечных элементов в программе COMSOL Multiphysics (модули Magneticfields и Electrical circuit раздела AC/DC). Рисунок 1 демонстрирует расчётную геометрию: цилиндрический участок стержня заданного диаметра и базовую конструкцию вихретокового преобразователя [3] – прямоугольную многовитковую катушку, расположенную на фиксированном расстоянии от поверхности стального стержня (имитация слоя бетона).

После расчета распределения электромагнитного поля системы (в модуле Magneticfields) определялись доступные для измерения электрические параметры измерительной электрической цепи (в модуле Electrical circuit), то есть изменения комплексного сопротивления индуктивной катушки, вызванные наличием вблизи как самой арматуры, так и арматуры с постулированными коррозионными дефектами.

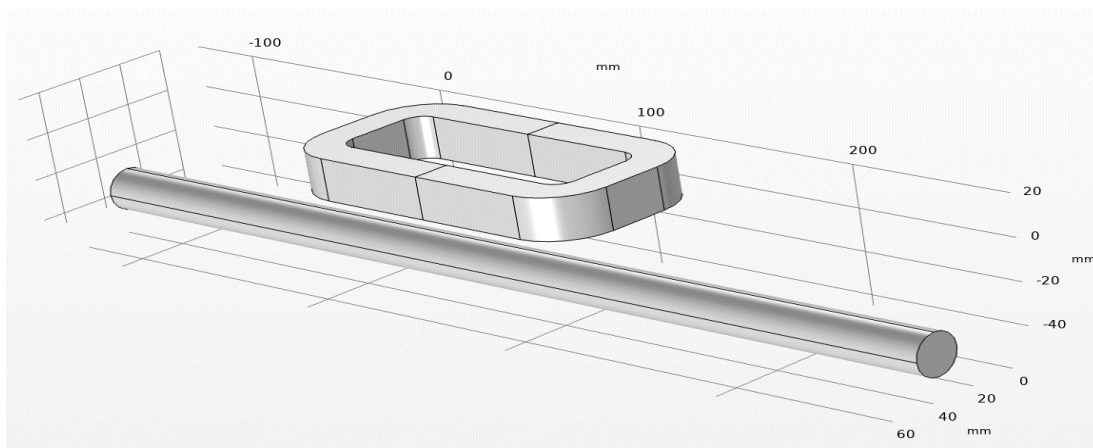


Рис. 1. Геометрия вихретоковой катушки и арматуры

Электрическая цепь представляет собой последовательную RLC схему (рисунок 2). В неё входят: идеальный источник гармонического напряжения U_{source} с плавной регулировкой частоты и амплитуды; настроечный реостат $R_{var} = 5 - 100$ Ом; многovitковая катушка, описываемая эквивалентным комплексным сопротивлением $R_{coil} + j\omega L_{coil}$; а также набор конденсаторов емкостью $C_{cond} = 1 - 20$ нФ. В среде COMSOL Multiphysics цепь соединена с терминалами катушки через интерфейс Electrical Circuit – Terminal, что позволяет прямо в численной модели отслеживать изменение комплексного импеданса катушки при различных условиях. Наиболее удобный регистрируемый параметр – напряжение U_{cond} на конденсаторе. В расчетах предполагается: емкость $C_{cond} = 11$ нФ; настроечный резистор $R_{var} = 5$ Ом.

Применяя второй закон Кирхгофа к электрической цепи, получаем следующие выражения для комплексных значений входного напряжения в отсутствии контролируемого образца («в воздухе»)

$$\underline{U}_{source} = (R_{coil} + R_{var})\underline{I} + j\left(\omega L_{coil} - \frac{1}{\omega C_{cond}}\right)\underline{I}, \quad (1)$$

Добавляя в схему омические потери ΔR_e и приращение индуктивности ΔL_e , обусловленные влиянием контролируемого образца, введем эффективные параметры R_{eff} и L_{eff} .

$$L_{eff} = L_{coil} + \Delta L_e, R_{eff} = R_{coil} + R_{var} + \Delta R_e \quad (2)$$

С их учетом уравнение (1) принимает вид

$$\underline{U}_{source} = R_{eff}\underline{I} + j\left(\omega L_{eff} + \frac{1}{j\omega C_{cond}}\right)\underline{I}$$

или, раскладывая L_{eff} ,

$$\underline{U}_{source} = R_{eff}\underline{I} + j\left(\omega L_{coil} - \frac{1}{\omega C_{cond}}\right)\underline{I} + j\omega \Delta L_e \underline{I}. \quad (3)$$

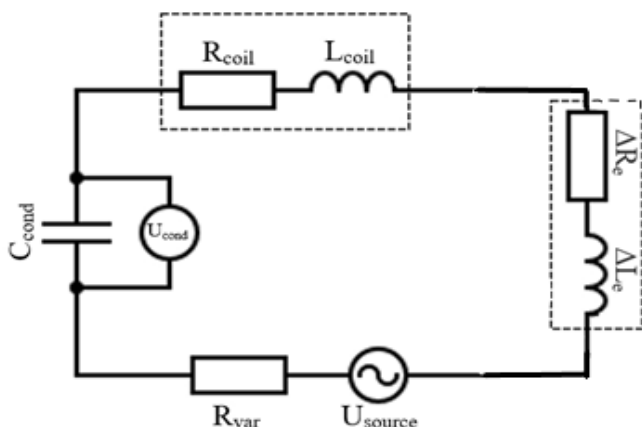


Рис. 2. Эквивалентная измерительная электрическая схема устройства

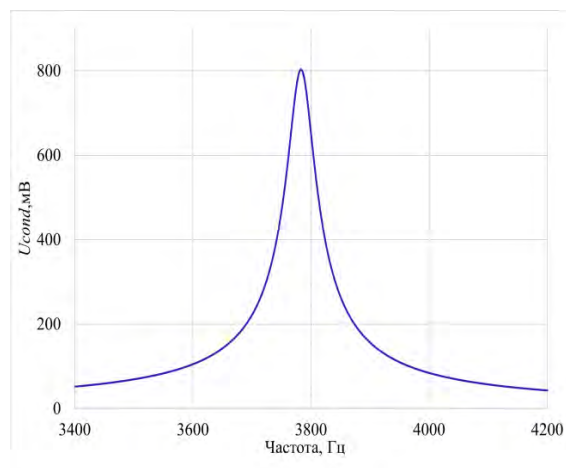


Рис. 3. Частотная характеристика U_{cond} ; стержень Ø20 мм, расстояние 20 мм

Изменением частоты схема первоначально настраивается так, чтобы выполнялось резонансное условие

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{coil}C_{cond}}}. \quad (4)$$

Напряжение на конденсаторе при резонансной частоте

$$\underline{U}_{cond} = \underline{I} \cdot \frac{1}{j\omega_0 C_{cond}} = -j \frac{\underline{U}_{source}(R_{eff} - j\omega_0 \Delta L_e)}{\omega_0 C_{cond}(R_{eff}^2 + (\omega_0 \Delta L_e)^2)} \quad (5)$$

На рисунке 3 показана резонансная характеристика измерительной RLC-цепи при работе катушки в воздушной среде (без исследуемого образца). Наблюдается четкий резонансный пик амплитудой около 800 мВ при частоте 3780 Гц. Крутизна резонансной кривой свидетельствует о высокой чувствительности системы: даже незначительное изменение частоты на 1% приводит к снижению амплитуды сигнала на 15 – 20 %. Такие характеристики позволяют уверенно детектировать малые изменения импеданса катушки, возникающие при сканировании корродированной арматуры.

При размещении датчика над контролируемым стержнем частота источника подстраивается до нового резонанса f_n , и тогда

$$L_{coil} + \Delta L_e = \frac{1}{(2\pi f_n)^2 C_{cond}} \quad (7)$$

$$(R_{coil} + R_{var} + \Delta R_e) = \frac{\underline{U}_{source}}{2\pi f_n C_{cond} \underline{U}_{cond}} \quad (8)$$

Эти выражения позволяют напрямую вычислить эффективные индуктивность и сопротивление при разных степенях коррозии арматуры и далее использовать их для количественного анализа дефектов.

2. Анализ влияния коррозионных дефектов и толщины защитного слоя на параметры вихретокового сигнала

Моделирование в COMSOL Multiphysics позволило исследовать влияние параметров коррозии на вихретоковый отклик. На рисунках 4-7 представлены зависимости эффективной индуктивности (L_{eff}) и сопротивления (R_{eff}) от трех ключевых факторов: степени утонения сечения с учетом протяженности поврежденного участка (L_{corr}), объема корродированного металла, а также от глубины залегания арматуры.

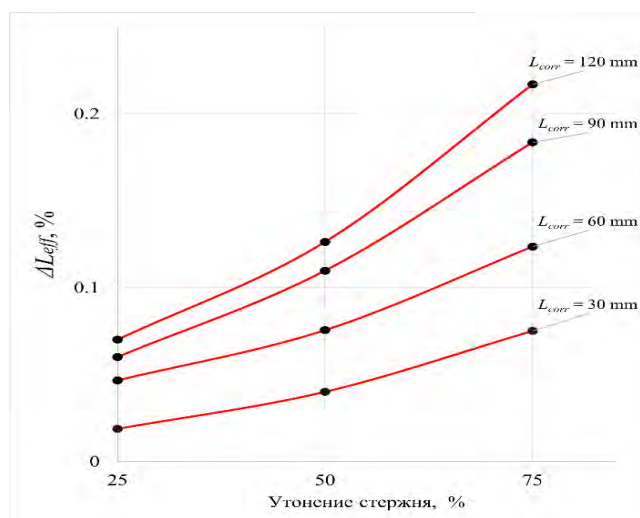


Рис. 4. Зависимость L_{eff} от степени коррозии для стержней диаметром 12 мм

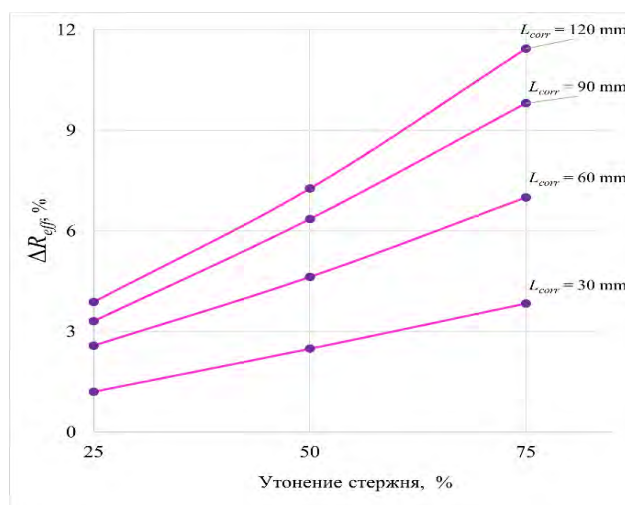


Рис. 5. Зависимость R_{eff} от степени коррозии для стержней диаметром 20 мм

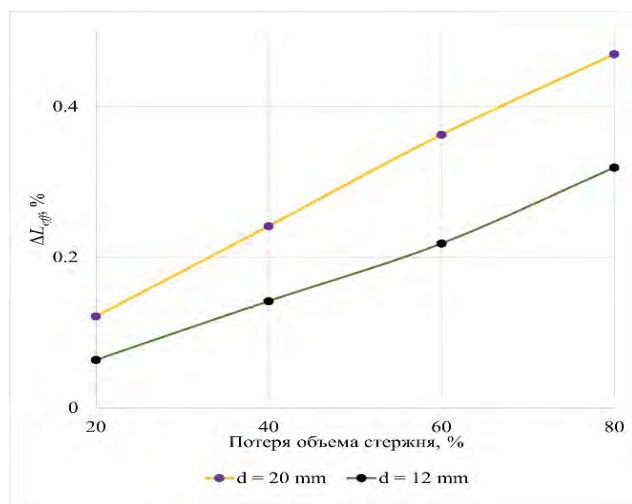


Рис. 6. Влияние объема корродированного металла на значение эффективной индуктивности L_{eff}

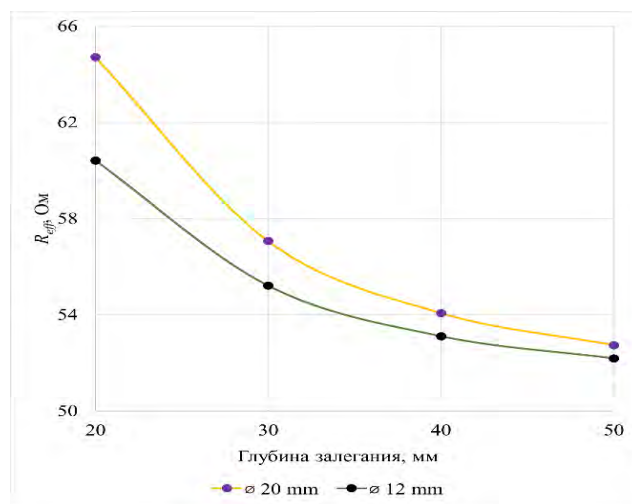


Рис. 7. Влияние глубины залегания арматуры на значение эффективного сопротивления R_{eff}

Для обоих диаметров стержней (12 и 20 мм) наблюдаются устойчивые изменения L_{eff} при развитии коррозии (см. рис. 4). Эффективная индуктивность демонстрирует выраженную зависимость от объема утраченного металла. Наибольшие изменения отмечаются при протяженности дефектов свыше 60 мм. Аналогичные закономерности прослеживаются и для эффективного сопротивления (рис. 5). R_{eff} реагирует на коррозионные повреждения, причем изменения более выражены при больших значениях L_{corr} . Это объясняется интегральным характером омических потерь в системе. Сопоставление данных (рис. 6) подтверждает, что оба контролируемого параметра ведут себя аналогично при изменении объема корродированного металла.

Влияние толщины защитного слоя бетона приведено на рис. 7. С увеличением глубины залегания отмечается закономерное ослабление сигнала, обусловленное уменьшением плотности электромагнитного поля в стальном стержне. Однако даже при значительных толщинах покрытия (до 50 мм) сохраняется возможность детектирования дефектов, что подтверждает перспективность метода для обследования реальных конструкций.

Заключение

Проведённое исследование подтвердило возможность вихретокового метода для эффективной оценки коррозионного состояния арматуры в железобетонных конструкциях. Моделирование в COMSOL Multiphysics показало, что параметры R_{eff} и L_{eff} чувствительны к изменению сечения стержней даже при значительной глубине их залегания. Метод позволяет не только обнаруживать дефекты, но и количественно оценивать степень повреждения. Комплексный анализ резонансных характеристик и разностного сигнала обеспечивает возможность локализации коррозионных участков.

В дальнейшем планируется разработать надежные алгоритмы анализа данных с учётом влияния реальных условий контроля и провести натурные испытания.

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: ФГБОУ ВО –НИУ –МЭИ”.- 2018.
2. ГОСТ 22904-93. Конструкции железобетонные. Термины и определения. дата введения 1995-01-01. – <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: São Paulo State University – Unesp. Department of Electrical Engineering 2015, 6.

Контакты:

bogotovIM@mpei.ru (Боготов Ислам Муратович)

sashashep17ru@gmail.com (Шепелев Александр Константинович)

luninvp@mpei.ru (Лунин Валерий Павлови)