

Key words: motor vehicle, on-board electrical complex.

Brachunova Uliana Viktorovna, postgraduate, aliss72@yandex.ru, Russia, Samara, Samara State Technical University,

Kozlovsky Vladimir Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, head of the department, Kozlovskiy-76@mail.ru, Russia, Samara, Samara State Technical University,

Nikolaev Pavel Alexandrovich, doctor of technical sciences, Head of the Laboratory of Electromagnetic Compatibility, npa690@yandex.ru, Russia, Togliatti, AVTOVAZ JSC,

Vasin Sergey Alexandrovich, doctor of technical sciences, professor, vasin_sa53@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.3.014.12

DOI: 10.24412/2071-6168-2023-4-524-528

К ВОПРОСУ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВИХРЕТОКОВОГО КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОПОР В ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИИ

А.В. Филонович, И.В. Ворначева, А.А. Чуйченко, В.В. Степанова,
С.А. Войнаш, В.А. Соколова, Р.Р. Загидуллин, Л.С. Сабитов

В работе рассмотрены основы теории скин-эффекта в приложении к длинным ферромагнитным проводникам при воздействии на них высокочастотного электромагнитного поля. Результаты данного исследования могут применяться для обработки экспериментальных данных, полученных в результате исследования усталостных свойств металлических опор в электроснабжении.

Ключевые слова: ферромагнитные материалы, скин-эффект, уравнение Бесселя.

Введение. В настоящее время элементы металлических конструкций в виде сплошных стальных цилиндров широко используются в различных узлах технических устройств (в гидроэлектростанциях, летательных аппаратах, радиосвязи (антенны), транспортных средствах (оси вагонов) и т.д.). При длительной эксплуатации таких деталей очень часто возникает вопрос о степени их износа и возможности дальнейшей эксплуатации. В таких случаях очень важно использование простого, технически доступного метода контроля качества, применимого в условиях производства, эксплуатации и ремонта. Один из способов контроля остаточного ресурса ферромагнитного изделия – исследование напряженно-состояния образца методом вихревых токов [1-10]. Применение его в совокупности с физико-математическими методами обработки экспериментальных данных способно дать надежную оценку времени безопасной эксплуатации, а также способствует оптимизации технологии изготовления стальных изделий. Поэтому цель данной работы провести анализ и обобщить существующие подходы к исследованию скин-эффекта в цилиндрических ферромагнитных телах.

Постановка задачи. Пусть образец для исследования в виде сплошного ферромагнитного цилиндра длиной l и диаметром d помещается в датчик проходного типа (рис.1). Геометрические параметры образца выбраны таким образом, чтобы выполнялось отношение $l/d \geq 10$, тогда поле в средней части датчика считается однородным, а размагничиванием образца можно пренебречь. Конструктивно датчик представляет собой две катушки, намотанные на общий каркас. Первая из них (на рис.1 не показана) является намагничивающей и подсоединяется к генератору через большое сопротивление. Это обеспечивает синусоидальность напряженности магнитного поля, как функции времени. При этом индукция является несинусоидальной, т.е. содержит высшие гармоники. Вторая катушка, радиусом R_u и числом витков w_u является измерительной. Её сигнал несет интегральную по сечению образца информацию об электрических и магнитных свойствах металла. Если образец подвергнуть циклическому нагружению, то в поверхностном слое металла образуется зародыш усталостного напряжения, имеющий локальные размеры [1]. Вокруг зародыша возникает напряженное состояние решетки в макроскопическом объеме, что приводит к изменению процессов намагничивания в этом объеме. Зона вокруг зародыша мала по сравнению с объемом образца. По этой причине, чтобы выявить изменение магнитных свойств зоны необходимо создать специальные условия. С этой целью измерительная обмотка должна выполняться как можно более узкой, и имеющей радиус R_u , близкий к радиусу образца R . Частота генератора f должна быть достаточно высокой, с целью обеспечения эффективной толщины проникновения поля на расстояния порядка глубины залегания зародыша. В поверхностном слое металла усталостные эффекты

проявляются на глубине $\delta_k \approx 300$ нм. Дадим оценку частоты f , при которой поле проникает на эту глубину. Полагая, что для стали магнитная проницаемость $\mu \approx 500$, электропроводность $\gamma = 1 \cdot 10^7$ (Ом·м)⁻¹ получим: $f = 1 / (\gamma \mu_0 \mu \delta_k^2 \pi) = 560$ МГц.

Уравнение скин-эффекта в ферромагнитном цилиндре. При помещении образца в переменное поле намагничивающей обмотки его магнитное состояние изменяется по петле гистерезиса. Для описания петли воспользуемся выражениями из [2] в комплексной форме записи.

$$\begin{aligned} H &= H_m e^{i\omega t}, \\ B &= \sum_{k=1}^N B_{mk} e^{i(k\omega t - \varphi_k)}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $i = \sqrt{-1}$, B_{mk} и φ_k – амплитуда и начальная фаза $k^{\text{й}}$ гармоники индукции, H_m – амплитуда напряженности поля, ω – его циклическая частота. Как показывает анализ влияния вида деформации на намагниченность образца [1], при одноосном растяжении (сжатии) петля гистерезиса остается симметричной и второе выражение в (1) будет содержать первую и высшие гармоники индукции. При кручении же петля гистерезиса сдвигается относительно центра симметрии и поэтому индукция в (1) будет содержать и четные гармоники.

Запишем уравнения Максвелла для скин-эффекта [3]:

$$\begin{aligned} \text{rot} \vec{H} &= \vec{j}, \\ \text{rot} \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}. \end{aligned}$$

А также закон Ома в форме: $\vec{j} = \gamma \vec{E}$. Далее, используя формулу векторного анализа $\text{rot rot} \vec{H} = \text{grad div} \vec{H} - \Delta \vec{H}$ и также факт отсутствия в природе магнитных зарядов $\text{div} \vec{H} = 0$, получим уравнение $\Delta \vec{H} = \gamma \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$. Записав оператор Лапласа Δ цилиндрической системе координат, получим:

$$\frac{d^2 H}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dH}{dr} = \gamma \frac{dB}{dt}$$

Найдем производную $\frac{dB}{dt}$ из (1):

$$\frac{dB}{dt} = \sum_{k=1}^N B_{mk} e^{-i\varphi_k} \left(\frac{k}{H_m} \right) \cdot \left(\frac{H}{H_m} \right)^{k-1} \frac{dH}{dt}.$$

Тогда

$$\frac{d^2 H}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dH}{dr} = \gamma \frac{B_{m1}}{H_m} e^{-i\varphi_1} \frac{dH}{dt} + \gamma \sum_{k=2}^N B_{mk} e^{-i\varphi_k} \left(\frac{k}{H_m} \right) \cdot \left(\frac{H}{H_m} \right)^{k-1} \frac{dH}{dt} \quad (2)$$

Величина $\frac{B_{m1}}{H_m} e^{-i\varphi_1}$ представляет собой комплексную магнитную проницаемость $\tilde{\mu}$ [4].

Решая уравнение (2) можно получить распределение поля в ферромагнитном цилиндре.

Приближенное решение уравнения скин-эффекта. Будем искать решение уравнения (2) в виде [5]:

$$H = \sum_{n=1}^{\infty} H_n(r) e^{in\omega t} \quad (3)$$

Тогда, подставив (3) в (2), получим:

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} e^{in\omega t} \frac{d^2 H}{dr^2} + \frac{1}{r} \sum_{n=1}^{\infty} e^{in\omega t} \frac{dH_n}{dr} &= \gamma \tilde{\mu} \sum_{n=1}^{\infty} H_n(r) e^{in\omega t} in\omega + \gamma \left[\sum_{k=2}^N B_{mk} e^{-i\varphi_k} \frac{k}{H_m} \left(\frac{1}{H_m} \sum_{n=1}^{\infty} H_n(r) e^{in\omega t} \right)^{k-1} \right] \times \\ &\times \left(\sum_{n=1}^{\infty} H_n(r) e^{in\omega t} in\omega \right); \end{aligned}$$

Раскроем сумму в правой части, оставив только члены с $k = 2$ и $k = 3$:

$$\sum_{n=1}^{\infty} e^{in\omega t} \frac{d^2 H}{dr^2} + \frac{1}{r} \sum_{n=1}^{\infty} e^{in\omega t} \frac{dH_n}{dr} = \gamma \tilde{\mu} \sum_{n=1}^{\infty} H_n(r) e^{in\omega t} in\omega + 2\gamma \frac{B_{m2}}{H_m^2} e^{-i\varphi_2} \sum_{n=1}^{\infty} H_n(r) e^{in\omega t} \times$$

$$\times \left(\sum_{n=1}^{\infty} H_n(r) e^{in\omega t} in\omega \right) + 3\gamma \frac{B_{m3}}{H_m^3} e^{-i\varphi_3} \left(\sum_{n=1}^{\infty} H_n(r) e^{in\omega t} \right)^2 \left(\sum_{n=1}^{\infty} H_n(r) e^{in\omega t} in\omega \right);$$

Последнее выражение можно представить, как сумму уравнений бесконечной системы (4):

$$\frac{d^2 H_1}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dH_1}{dr} = \gamma \tilde{\mu} \cdot i\omega H_1,$$

$$\frac{d^2 H_2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dH_2}{dr} = 2\gamma \tilde{\mu} \cdot i\omega H_2 + 2\gamma \tilde{a}_1 i\omega H_1^2,$$

$$\frac{d^2 H_3}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dH_3}{dr} = 3\gamma \tilde{\mu} \cdot i\omega H_3 + 6\gamma \tilde{a}_1 i\omega H_1 H_2 + 3\gamma \tilde{a}_2 i\omega H_1^3,$$

.....

где $\tilde{a}_1 = \frac{B_{m2}}{H_m^2} \cdot e^{-i\varphi_2}$, $\tilde{a}_2 = \frac{B_{m3}}{H_m^3} \cdot e^{-i\varphi_3}$ – комплексные коэффициенты, характеризующие нелинейность намагничивания образца.

Выражения в системе (4) представляют собой уравнения Бесселя. При больших значениях частоты ω , когда глубина проникновения много меньше радиуса цилиндра вторыми слагаемыми в левых частях можно пренебречь и решать (4) как систему дифференциальных уравнений второго порядка. Эти приближенные решения будут иметь вид:

$$H_1 = H_m \cdot e^{-(R-r)\sqrt{i\gamma\omega\tilde{\mu}}}, \quad H_2 = -\frac{\tilde{a}_1 H_m^2}{\tilde{\mu}} \left(e^{-(R-r)\sqrt{2i\gamma\omega\tilde{\mu}}} - e^{-(R-r)\sqrt{4i\gamma\omega\tilde{\mu}}} \right),$$

$$H_3 = \frac{\beta}{b^2 - \alpha} \left(e^{-(R-r)\sqrt{\alpha}} - e^{-(R-r)b} \right) + \frac{\beta + p}{g^2 - \alpha} \left(e^{-(R-r)g} - e^{-(R-r)\sqrt{\alpha}} \right),$$

где $\alpha = 3\gamma\tilde{\mu}i\omega$, $b = \sqrt{i\gamma\omega\tilde{\mu}}(\sqrt{2} + 1)$, $\beta = \frac{6\gamma\tilde{a}_1 i\omega H_m^3}{\tilde{\mu}}$, $p = 3\gamma\tilde{a}_2 i\omega H_m^3$, $g = \sqrt{9i\gamma\omega\tilde{\mu}}$.

Вычисление гармоник ЭДС измерительной катушки. Предположим, что радиус измерительной обмотки R_u равен радиусу образца R . Тогда первая гармоника ЭДС:

$$E_1 = -\frac{2\pi R_u w_u}{\gamma} \left(\frac{\partial H_1}{\partial r} \right)_{r=R} = 2\pi R_u w_u H_m \sqrt{\frac{i\omega\tilde{\mu}}{\gamma}}.$$

Соответственно при $R_u > R$:

$$E_1 = -i\mu_0 H_m (R_u - R) \pi \omega w_u R_u + 2\pi R_u w_u H_m \sqrt{\frac{i\omega\tilde{\mu}}{\gamma}}. \tag{5}$$

Аналогично можно найти и другие гармоники:

$$E_2 = 2\pi R_u w_u \tilde{a}_1 H_m^2 \sqrt{\frac{i\omega}{\gamma\tilde{\mu}}} (2 - \sqrt{2}), \tag{6}$$

$$E_3 = 2\pi R_u w_u H_m^3 \sqrt{\frac{i\omega}{\gamma\tilde{\mu}}} \left(\frac{6\tilde{a}_1 + 3\tilde{a}_2 \tilde{\mu}}{\tilde{\mu}(3 + \sqrt{3})} - \frac{6\tilde{a}_1}{\sqrt{3} + \sqrt{2} + 1} \right). \tag{7}$$

ЭДС преобразователя в отсутствии образца определяется выражением:

$$E_0 = -i\mu_0 \omega w_u H_m \pi R_u^2. \tag{8}$$

Гармоники ЭДС E_1, E_2, E_3 , а также величина E_0 , при отсутствии образца внутри преобразователя, могут быть определены из эксперимента. Если полагать также известными $w_u, \omega, R_u, \gamma, R$, то уравнения (5) - (8) образуют замкнутую систему, решая которую можно найти $\tilde{\mu}, \tilde{a}_1, \tilde{a}_2$.

Таким образом, исследование поведения величин $\tilde{\mu}, \tilde{a}_1, \tilde{a}_2$ в процессе циклического нагружения ферромагнитных образцов может послужить основой для разработки датчиков, определяющих деградацию структуры стальных изделий, позволит определять изменение усталостных характеристик, а, следовательно, приведет к созданию новых методов диагностики прочностных свойств.

Список литературы

1. Шаповалова Ю.Д. Ускоренное определение усталостных свойств сталей вихретоковым методом: монография / Ю.Д. Шаповалова, С.Г. Емельянов, Д.И. Якиревич; Федеральное агентство по образованию, Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования "Курский гос. технический ун-т". – Курск: Курский гос. технический ун-т, 2009 (Курск: ПБОЮЛ Киселева О.В.). 132 с.
2. Король Е.Г. Анализ методов моделирования петли гистерезиса ферромагнитных материалов // Электротехника и электромеханика. 2007. №6. С. 44-47.
3. Тамм И. Е. Основы теории электричества. Изд. 3-е. М.-Л., 1946. 660 с.
4. Нейман Л. Р. Поверхностный эффект в ферромагнитных телах. – М.: ГЭИ, 1949. 136 с.
5. Герасимов и др. Неразрушающий контроль качества ферромагнитных изделий электромагнитными методами. – М.: Энергия, 1978. 215 с.
6. Гадалов В.Н. Оптимизация электроакустического нанесения покрытий для повышения эксплуатационных свойств композитов из жаропрочных сплавов на основе никеля / Гадалов В.Н., Емельянов С.Г., Сафонов С.В., Ворначева И.В., Филонович А.В. // Вестник машиностроения. 2017. № 6. С. 7-9.
7. Гадалов В.Н. Повышение надежности оснастки и инструмента штампового оборудования / Гадалов В.Н., Гвоздев А.Е., Стариков Н.Е., Романенко Д.Н., Калинин А.А., Филатов Е.А., Макарова И.А., Ворначева И.В. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 11-2. С. 114-124.
8. Гадалов В.Н. Применение основ термодинамики при разработке неразрушающего метода измерения предела выносливости стали / Гадалов В.Н., Беседин А.Г., Филатов Е.А., Ворначева И.В., Макарова И.А. // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2018. № 1. С. 37-40.
9. Гадалов В.Н. Исследование напряженного состояния в поверхностных слоях доэвтектоидной стали после электролитного борирования / Гадалов В.Н., Филонович А.В., Беседин А.Г., Ворначева И.В., Тураева О.А. // Современные наукоемкие технологии. 2017. № 2. С. 12-16.
10. Гадалов В.Н. Идентификация размеров дефектов при вихретоковом контроле / Гадалов В.Н., Губанов О.М., Филонович А.В., Ворначева И.В. // Справочник. Инженерный журнал. 2021. № 11 (296). С. 16-19.

Филонович Александр Владимирович, д-р техн. наук, профессор, filon8@yandex.ru, Россия, Курск, Юго-Западный государственный университет,

Ворначева Ирина Валерьевна, канд. техн. наук, доцент, vornairina2008@yandex.ru, Россия, Курск, Юго-Западный государственный университет,

Чуйченко Артем Андреевич, доцент, chuichenkoa@mail.ru, Россия, Курск, Юго-Западный государственный университет,

Степанова Виктория Валерьевна, преподаватель, Stepanova.viktor@mail.ru, Россия, Курск, Юго-Западный государственный университет,

Войнаш Сергей Александрович, ведущий инженер научно-исследовательской лаборатории «Интеллектуальная мобильность» Института дизайна и пространственных искусств, sergey_voi@mail.ru, Россия, Казань, Казанский федеральный университет,

Соколова Виктория Александровна, канд. техн. наук, доцент, sokolova_vika@inbox.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна,

Загидуллин Рамиль Равильевич, канд. техн. наук, доцент, r.r.zagidullin@mail.ru, Россия, Казань, Казанский федеральный университет,

Сабитов Линар Салихзанович, д-р техн. наук, доцент, lsabitov@bk.ru, Россия, Казань, Казанский федеральный университет, Казанский государственный энергетический университет

TO THE QUESTION OF THE USE OF EDDY CURRENT CONTROL OF METAL SUPPORTS IN POWER SUPPLY

A.V. Filonovich, I.V. Vornacheva, A.A. Chuichenko, V.V. Stepanova, S.A. Voinash, V.A. Sokolova, R.R. Zagidullin, L.S. Sabitov

The paper considers the fundamentals of the skin effect theory as applied to long ferromagnetic conductors exposed to a high-frequency electromagnetic field. The results of this study can be used to process experimental data obtained as a result of studying the fatigue properties of metal supports in power supply.

Key words: ferromagnetic materials, skin effect, Bessel equation.

Filonovich Alexander Vladimirovich, doctor of technical sciences, professor, filon8@yandex.ru, Russia, Kursk, South-West State University,

Vornacheva Irina Valerievna, candidate of technical sciences, docent, vornairina2008@yandex.ru, Russia, Kursk, South-West State University,

Chuichenko Artem Andreevich, docent, chuichenkoa@mail.ru, Russia, Kursk, South-West State University,

Stepanova Victoria Valeryevna, lecturer, Stepanova.viktor@mail.ru, Russia, Kursk, South-West State University,

Voinash Sergey Alexandrovich, leading engineer of the research laboratory "Intellectual Mobility" of the Institute of Design and Spatial Arts, sergey_voi@mail.ru, Russia, Kazan, Kazan Federal University,

Sokolova Victoria Aleksandrovna, candidate of technical sciences, docent, sokolova_vika@inbox.ru, Russia, St. Petersburg, St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,

Zagidullin Ramil Ravilevich, candidate of technical sciences, docent, r.r.zagidullin@mail.ru, Russia, Kazan, Kazan Federal University,

Sabitov Linar Salikhzanovich, doctor of technical sciences, docent, lsabitov@bk.ru, Russia, Kazan, Kazan Federal University, Kazan State Power Engineering University

УДК 621.314.63

DOI: 10.24412/2071-6168-2023-4-528-533

ПОДХОД К СИНТЕЗУ И РЕАЛИЗАЦИИ ТРЕХФАЗНОГО УПРАВЛЯЕМОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

А.В. Новаков, В.Е. Дубальский, В.В. Гладков

В статье предлагается подход к формированию структуры с последующим составлением схемы управляемого трехфазного мостового выпрямителя. Предлагаемая структура выпрямителя состоит из силовой части, выходного фильтра, блока питания, тиристорного драйвера, формирователя импульса сброса, генератора линейно изменяющихся напряжений и узла сравнения. Рассматриваемый вариант реализации предназначен для работы с трехфазной сетью частотой 50 Гц и линейным напряжением 80 Вольт. Выпрямитель управляется аналоговым сигналом, на выходе получаем среднее значение выпрямленного напряжения, сглаженное фильтром. Угол запаздывания управляющего напряжения лежит в диапазоне от 30, до 210 градусов.

Ключевые слова: трехфазный выпрямитель, система управления, тиристор.

Схемы управляемых выпрямителей (УВ) на тиристорах дают возможность изменять выпрямленное напряжение в широких пределах. А системы управления позволяют достигнуть высокой стабилизации. Управляемый выпрямитель состоит из 3 диодов и 3 тиристоров, соединенных по схеме Ларионова [1], [2]. По схеме Ларионова возможно получить сравнительно малый коэффициент пульсаций на выходе. Возможно получение зависимости среднего значения выпрямленного напряжения при управлении тремя вентилями в режиме как прерывистого тока, так и в режиме непрерывного тока, так как эти зависимости определяются одним и тем же соотношением [3]. Соединяя в себе достоинства мостового выпрямителя и трехфазного питания, он имеет настолько низкий уровень пульсаций, что позволяет работать без сглаживающего фильтра.

Предполагается, что разрабатываемый выпрямитель будет применен в системе управления приводом постоянного тока [4], [5], но так же может быть использован в других целях. Для управления различными электроприводами с использованием двигателей постоянного тока необходим управляемый выпрямитель, способный менять среднее значение выходного напряжения в некотором диапазоне, в нашем случае этот диапазон будет составлять от 0, до 130 Вольт. Предлагается структура построения управляемого трехфазного выпрямителя в виде блок-схемы представленной на рис. 1.