

Ю.В. Батыгин, д.т.н., проф.
Т.В. Гаврилова, к.ф.-м.н., доц.
С.А. Шиндерук, к.т.н., доц.
Е.А. Чаплыгин, к.т. н., доц.
В.А. Саенко, студент

Харьковский автомобильно-дорожный университет

Плоская индукторная система с массивными катушками бифиляра. Анализ электромагнитных процессов

Предложен вариант разработки нового конструктивного решения для инструментов на основе индукторных систем. Впервые рассмотрена плоская индукторная система, состоящая из тонкого соленоида – индуктора, размещённого между витками бифиляра – массивными многovitковыми катушками из хорошо проводящего металла. На основании решения электродинамической задачи проведены анализ и численные оценки характеристик электромагнитных процессов в данной системе. Установлено, что эффективность возбуждения тока в обмотках бифиляра весьма слабо зависит от расстояния между индуктором и бифиляром, радиальное распределение индуцированного тока является практически равномерным, и влияние возбуждаемого магнитного поля на процессы собственно в индукторе должно быть весьма незначительным. Результаты проведенного анализа и вычислений для экспериментальной модели позволяют дать заключение о практической работоспособности впервые предложенной индукторной системы, возбуждаемой плоским круговым соленоидом, размещённым между массивными обмотками бифиляра.

Полученные результаты предлагается использовать при создании новых схем оборудования для магнитно-импульсной обработки металлов. Использованная методика теоретического исследования приводит к расширению круга рассмотрения аналогичных задач, например, позволяет исследовать электромагнитные процессы в плоских индукторных системах, где многovitковые соленоиды размещают между ветвями массивных бифилярных катушек.

Ключевые слова: индукторная система; бифиляр; индуцированный ток; плоский круговой соленоид.

Актуальность темы. Решение задач прикладной электродинамики долгие годы вызывает пристальный интерес в самых разных областях науки и техники. В данном исследовании авторы рассматривают применение таких задач для случая сильных и сверхсильных электромагнитных полей. Получение теоретического анализа электромагнитных процессов в сложных электродинамических системах, таких как, например, бифилярная катушка с обмоткой, представленной двумя параллельными изолированными друг от друга проводниками. В случае плоского варианта бифиляр может быть выполнен в виде двух отдельных одинаковых параллельных обмоток, размещённых одна на другой. Такая конструкция позволяет реализовать две основные физические ситуации. Первая из них предполагает протекание в обмотках противоположно направленных токов. В этом случае магнитное поле вне бифиляра стремится к нулю, что обеспечивает его минимально возможную индуктивность. Вторая физическая ситуация имеет место при протекании в обмотках бифиляра однонаправленных токов. В данном случае суперпозиция возбуждаемых магнитных полей даёт нулевую напряжённость уже между обмотками бифиляра. Практический интерес, а именно, для конструирования инструментов магнитно-импульсной обработки металлов представляет плоская индукторная система, состоящая из тонкого соленоида – индуктора, размещённого между ветвями бифиляра – массивными многovitковыми катушками из хорошо проводящего металла.

Анализ последних достижений и публикаций. Перечень возможных практических применений бифиляров с разными способами соединения обмоток в различных электротехнических устройствах описан в научной монографии [1]. Развитию методов расчёта характеристик электромагнитных процессов в соленоидах, выступающих в качестве источников сильных полей для технологических целей и полей излучения в передающих устройствах, посвящены работы [2, 3]. Так вниманием научной монографии [2] сконцентрировано на численных методах, авторы работы [3] описывают комбинированный подход к вычислению, позволивший рассчитать магнитные поля в плоских катушках различной геометрии. Особый интерес представляет научное издание [4], где обобщён многолетний опыт постановки и решения наиболее распространённых задач прикладной электродинамики в области сильных и сверхсильных электромагнитных полей. Для схем оборудования магнитно-импульсной обработки металлов, представленных авторами научных изданий [5, 6, 7], практическое значение

представляют плоские индукторные системы, в которых многovitковый соленоид-индуктор размещается между ветвями массивной бифилярной катушки, в обмотках которой индуцируется мощный токовый импульс при минимальном влиянии его поля на электромагнитные процессы в соленоиде-индукторе. Интересом к вышеуказанной конструкции индукторной системы обусловлено появление работы [8], где впервые была предложена конкретная конструкция и найдены аналитические выражения для напряжённостей возбуждаемых полей и токов. С помощью результатов этой работы можно провести теоретический анализ электромагнитных процессов, дать физико-математическую интерпретацию основных характеристик и обосновать практическую дееспособность предложенной индукторной системы.

Цель исследования, на основании анализа электромагнитных процессов, происходящих во впервые предложенной индукторной системе, состоящей из плоских параллельных многovitковых соленоидов, одним из которых есть тонкий индуктор, размещённый между ветвями массивного бифиляра, теоретически обосновать практическую работоспособность исследуемой системы.

Изложение основного материала. Для решения поставленной задачи выпишем из работы [8] все необходимые аналитические зависимости. Кроме того, для ясности в изложении приведем физико-математическую модель предложенной индукторной системы (рис. 1) и основные допущения, принятые авторами [8] и определяющие границы применимости полученных расчётных соотношений.

Таким образом, принимается следующее.

– Геометрические параметры исследованной индукторной системы соответствуют расчётной модели на рисунке 1.

– Исследованная система обладает аксиальной симметрией.

– Поперечные размеры намного меньше радиальных, что позволяет пренебречь краевыми эффектами.

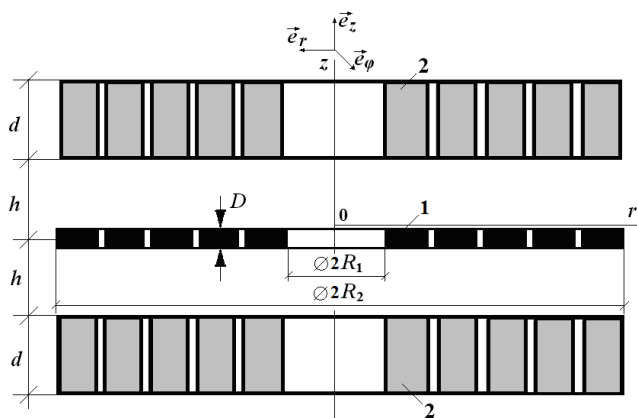


Рис. 1. Расчётная модель индукторной системы:
1 – плоский многovitковый соленоид-индуктор;
2 – ветви бифиляра – плоские многovitковые соленоиды

– Витки бифилярной катушки достаточно массивны, выполнены из металла с высокой проводимостью и плотно примыкают друг к другу, так что их поверхность со стороны индуктора-соленоида можно считать сплошной поверхностью из идеального проводника.

– Витки соленоида-индуктора достаточно тонки, плотно прилегают друг к другу, «прозрачны» для возбуждаемых полей и не влияют на протекающие электромагнитные процессы [4, 5, 7].

– В соленоиде-индукторе протекает гармонический ток с амплитудно-временной функцией плотности – $j = j_m \cdot \sin(\omega \cdot t)$,

равномерным радиальным распределением $f(r) = \eta(r - R_1) - \eta(r - R_2)$;

амплитудой – $j_m = I_m / (R_2 - R_1)$ (I_m – амплитуда тока) и циклической частотой – ω .

– Электромагнитные процессы квазистационарны, что позволяет пренебречь токами смещения [9].

Напряжённости возбуждаемого электромагнитного поля описываются следующими зависимостями:

а) напряжённость электрического поля

$$E_\varphi(t, r, z) = \frac{\mu_0 \omega j_m}{2} \cdot \sin(\omega t) \int_0^\infty f(\lambda) (\text{sh}(\lambda z) (2\eta(z) - 1) - \text{th}(\lambda h) (\lambda h) \text{cz}) J_1(\lambda r) d\lambda, \quad (1)$$

где $f(\lambda) = \int_0^{\infty} f(r) \cdot J_1(\lambda r) r dr = \int_{R_1}^{R_2} J_1(\lambda r) r dr$,

$J_1(\lambda r)$ – функция Бесселя первого рода первого порядка, $\eta(z)$ – ступенчатая функция Хевисайда [9];
б) напряжённость магнитного поля

$$H_r(t, r, z) = \frac{j_m}{2} \cdot \sin(\omega t) \int_0^{\infty} f(\lambda) (\operatorname{ch}(\lambda z) (2\eta(z) - 1) - \frac{\operatorname{sh}(\lambda h)}{\operatorname{ch}(\lambda h)} \operatorname{sh}(\lambda z)) J_1(\lambda r) \lambda d\lambda. \quad (2)$$

Временной максимум линейной плотности тока, возбуждаемого в металле обмоток бифиляра, определяется выражением:

$$j_{1\max}(t) = \frac{j_m}{2} \int_0^{\infty} \frac{f(\lambda)}{\operatorname{ch}(\lambda h)} J_1(\lambda r) \lambda d\lambda. \quad (3)$$

Из зависимости (3) находим радиальное распределение временного максимума плотности индуцированного тока в отношении к временному максимуму плотности тока в индукторе. После необходимых тождественных преобразований получаем зависимость, удобную для численных оценок.

$$\frac{j_{1\max}(t)}{j_m} = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} \left(\int_{\lambda R_1}^{\lambda R_2} y \cdot J_1(y) dy \right) \frac{J_1(\lambda r)}{\lambda \cdot \operatorname{ch}(\lambda h)} d\lambda. \quad (4)$$

Интегрируя плотность возбуждаемого тока по радиусу $r \in [R_1, R_2]$, можно найти полный ток в каждой обмотке бифиляра. С нормировкой на амплитуду тока в индукторе получаем выражение, которое можно интерпретировать как коэффициент трансформации по току в электрическом преобразователе «индуктор – бифиляр».

$$\frac{I_{1\max}(t)}{I_m} = \frac{1}{2(R_2 - R_1)} \int_0^{\infty} \left(\int_{\lambda R_1}^{\lambda R_2} y \cdot J_1(y) dy \right) \frac{(J_0(\lambda R_1) - J_0(\lambda R_2))}{\lambda^2 \cdot \operatorname{ch}(\lambda h)} d\lambda, \quad (5)$$

где $J_0(\lambda R_{1,2})$ – функция Бесселя первого рода нулевого порядка [10].

С помощью выражений (1–5) проанализируем электромагнитные процессы в исследованной индукторной системе. Условно окружим обмотку индуктора-соленоида замкнутым контуром –

S: $\left\{ z \in \left[-\frac{\Delta}{2}, +\frac{\Delta}{2} \right], r \in [R_1, R_2] \right\}$. Интеграл по этому контуру от напряжённости магнитного поля будет

равен току – J_e , возбуждаемому собственно этим магнитным полем. Если принять, что поперечный размер достаточно мал и $\Delta/R_{1,2} \ll 1$, то интегрирование по контуру S сводится к интегралу по радиусу $r \in [R_1, R_2]$

На сторонах $\left\{ z = \pm \frac{\Delta}{2}, r \in [R_1, R_2] \right\}$, как следует из выражения (2), напряжённости возбуждаемого

магнитного поля будут равны:

$$H_r(t, r, z = \pm \frac{\Delta}{2}) = \pm \frac{j_m}{2} \cdot \sin(\omega t) \int_0^{\infty} f(\lambda) (\operatorname{ch}(\lambda \frac{\Delta}{2}) (2\eta(z) - 1) - \frac{\operatorname{sh}(\lambda h)}{\operatorname{ch}(\lambda h)} \operatorname{sh}(\lambda \frac{\Delta}{2})) J_1(\lambda r) \lambda d\lambda. \quad (6)$$

Интегрируя (6), получаем

$$I_e = \int_{R_1}^{R_2} \left(H_r(t, r, z = \frac{\Delta}{2}) + H_r(t, r, z = -\frac{\Delta}{2}) \right) dr. \quad (7)$$

Результат (7) свидетельствует о том, что в исследуемой индукторной системе влияние возбуждаемого магнитного поля на процессы собственно в индукторе должно быть весьма несущественным.

Перейдём к численным оценкам. На рисунках 2–3 представлены результаты вычислений для экспериментальной модели исследуемой индукторной системы с параметрами: $R_1 = 0,015$ м, $R_2 = 0,09$ м,

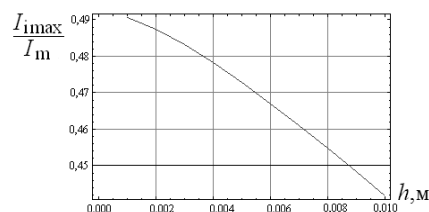


Рис. 2. Отношение тока в каждой обмотке бифиляра к току индуктора в зависимости от расстояния между ними

Приведенная на рисунке 2 зависимость тока в обмотках бифиляра от расстояния между каждой обмоткой и индуктором в диапазоне $h = 0,001 \dots 0,01$ м свидетельствует, что в данном случае амплитуда тока, индуцированного в обмотке бифиляра, изменяется незначительно, а именно, падает не более чем на $\sim 5\%$.

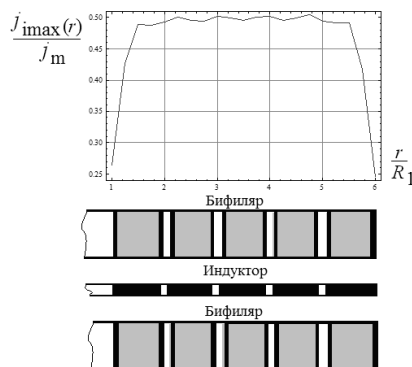


Рис. 3. Радиальное распределение относительной амплитуды плотности тока в каждой обмотке бифиляра, $h = 0,001$ м

На рисунке 3 представлен график амплитуды плотности тока в каждой обмотке бифиляра относительно амплитуды плотности тока в индукторе в зависимости от относительной радиальной координаты. Очевидно, что практически постоянное максимальное значение вычисляемой величины наблюдается в интервале $r/R_1 = 1,5 \dots 5,5$, что соответствует центру системы.

Выводы и перспективы дальнейших исследований. В результате теоретического анализа и численных оценок характеристик электромагнитных процессов во впервые предложенной плоской индукторной системе, состоящей из тонкого соленоида-индуктора, размещённого между ветвями бифиляра, состоящего из массивных многовитковых катушек из хорошо проводящего металла, получено, что:

- влияние возбуждаемого магнитного поля на процессы собственно в индукторе должно быть весьма незначительным;
- эффективность возбуждения тока в обмотке бифиляра весьма слабо зависит от расстояния между индуктором и бифиляром;
- имеет место практически равномерное радиальное распределение индуцированного тока.

Таким образом, результаты проведенного анализа и вычислений для экспериментальной модели позволяют дать заключение о практической работоспособности впервые предложенной индукторной системы, а также предложить рекомендации о выборе параметров при создании новых схем оборудования для магнитно-импульсной обработки металлов.

Работа выполнена в Харьковском национальном автомобильно-дорожном университете в рамках научно-исследовательской работы по госбюджетной теме № 08-53-19 «Энергосберегающие малозатратные технологии создания и ремонта гибридных транспортных средств различного назначения», а именно второго ее направления, выполняемого кафедрой физики ХНАДУ: «Энергосберегающие малозатратные технологии питания и ремонта транспортных средств», которые являются составной частью научной тематики, развиваемой в университете.

Список использованной литературы:

1. Padamanabhan K. Electronic Components / K.Padamanabhan, P.Swaminathan. – Laxmi Publications, 2016.
2. Yalçın O. Ferromagnetic resonance – Theory and Applications / O.Yalçın. – IntechOpen Publ., 2013. – 239 p.
3. Никущенко А.Н. Разработка модели излучения плоской катушки / А.Н. Никущенко, Н.В. Богач // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций. РТ-2010. – Севастополь, 2010. – С. 362–366.
4. Shneerson G.A. Strong and superstrong pulsed magnetic field generation / G.A. Shneerson, M.I. Dolotenko, S.I. Krivosheev. – Berlin : Walter de Gruyter, 2014. – 362 p.
5. Batygin Yu.V. Magnetic pulsed processing of metals for advanced technologies of modernity – a brief review / Yu.V. Batygin, E.A. Chaplygin, O.S. Sabokar // Electrical engineering & electromechanics. – 2016. – Vol. 5. – P. 35–39.
6. The main inventions for technologies of the magnetic-pulsed attraction of the sheet metals. a brief review / Yu.V. Batygin, E.A. Chaplygin, S.A. Shinderuk, V.A. Strehnikova // Electrical engineering & electromechanics. – 2018. – Vol. 3. – P. 43–52.
7. Batygin Y. Electromagnetic Metal Forming for Advanced Processing Technologies / Y.Batygin, M.Barbashova, O.Sabokar. – Cham, Switzerland : Springer International Publishing AG, 2018. – 93 p.
8. Плоская индукторная система с массивными катушками бифиляра. Расчётные соотношения / Ю.В. Батыгин, Е.А. Чаплыгин, С.А. Шиндерук, Т.В. Гаврилова, И.А. Балбекин // Автомобильный транспорт. – 2019. – № 45. – С. 48–53.
9. Ландау Л.Д. Электродинамика сплошных сред. Т. 8 / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – 4-е изд. – Москва : Физматлит, 2005. – 656 с.

10. Korn G.A. *Mathematical Handbook for Scientists and Engineers: definitions, theorems, and formulas, for reference and review* / G.A. Korn, T.M. Korn ; by Dover ed. – Mineola ; N.Y. : Dover Publications, 2000. – 1130 p.

References:

1. Padamanabhan, K. and Swaminathan, P. (2016), *Electronic Components*, Laxmi Publications.
2. Yalçın, O. (2013), *Ferromagnetic resonance – Theory and Applications*, IntechOpen Publ., 239 p.
3. Nikishenko, A.N. and Bogach, N.V. (2010), «Razrabotka modeli izlucheniya ploskoj katushki», *Sovremennye problemy radiotekhniki i telekommunikacij. RT-2010*, Sevastopol', pp. 362–366.
4. Shneerson, G.A., Dolotenko, M.I. and Krivosheev, S.I. (2014), *Strong and superstrong pulsed magnetic field generation*, Walter de Gruyter, Berlin, 362 p.
5. Batygin, Yu.V., Chaplygin, E.A. and Sabokar, O.S. (2016), «Magnetic pulsed processing of metals for advanced technologies of modernity – a brief review», *Electrical engineering & electromechanics*, Vol. 5, pp. 35–39.
6. Batygin, Yu.V., Chaplygin, E.A., Shinderuk, S.A. and Strelnikova, V.A. (2018), «The main inventions for technologies of the magnetic-pulsed attraction of the sheet metals. a brief review», *Electrical engineering & electromechanics*, Vol. 3, pp. 43–52.
7. Batygin, Y., Barbashova, M. and Sabokar, O. (2018), *Electromagnetic Metal Forming for Advanced Processing Technologies*, Springer International Publishing AG, Cham, Switzerland, 93 p.
8. Batygin, Ju.V., Chaplygin, E.O., Shinderuk, S.O., Gavrilova, T.V. and Balbekin, I.A. (2019), «Ploskaja induktornaja sistema s massivnymi katushkami bifiljara. Raschjotnye sootnosheniya», *Avtomobil'nij transport*, No. 45, pp. 48–53.
9. Landau, L.D. and Lifshic, E.M. (2005), *Jelektrodinamika sploshnyh sred*, in volumes, Vol .8, 4th ed., Fizmatlit., Moskva, 656 p.
10. Korn, G.A. and Korn, T.M. (2000), *Mathematical Handbook for Scientists and Engineers: definitions, theorems, and formulas, for reference and review*, in Dover (ed.), Dover Publications, Mineola, N.Y., 1130 p.

Батыгин Юрий Викторович – доктор технических наук, профессор кафедры физики Харьковского национального автомобильно-дорожного университета.

Научные интересы:

- электродинамика;
- электротехника.

E-mail: yu.v.batygin@gmail.com

ORCID: 0000-0002-1278-5621

Гаврилова Татьяна Владимировна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики Харьковского национального автомобильно-дорожного университета.

Научные интересы:

- электродинамика;
- электротехника.

E-mail: gavrilovala.tatyana@i.ua

Шиндерук Светлана Александровна – кандидат технических наук, доцент кафедры физики Харьковского национального автомобильно-дорожного университета.

Научные интересы:

- электродинамика;
- электротехника.

E-mail: s.shinderuk.2016102@ukr.net

ORCID: 0000-0002-6354-4174

Чаплыгин Евгений Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры физики Харьковского национального автомобильно-дорожного университета.

Научные интересы:

- электродинамика;
- электротехника.

E-mail: chaplygin.e.a@gmail.com

ORCID: 0000-0003-1448-6091

Саенко Владислав Александрович – студент Харьковского национального автомобильно-дорожного университета.

Научные интересы:

- электродинамика;
- электротехника.

E-mail: saenko_01@ukr.net

Статья поступила в редакцию 04.10.2019.