

Ю. В. Батигін¹
Є. О. Чаплигін¹
С. О. Шиндерук¹
Т. В. Гаврилова¹
Д. А. Коваленко¹

ЦИЛІНДРИЧНА ІНДУКТОРНА СИСТЕМА З ВНУТРІШНІМ БІФІЛЯРНИМ СОЛЕНОЇДОМ. АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Розглянуто циліндричну індукторну систему з внутрішнім коаксіальним соленоїдом, обмотка якого виконана у вигляді біфіляра. Фізико-математична модель запропонованої системи передбачає такі умови роботи, коли зовнішній індуктор вимкнений, його витки виконані з металу з високою електропровідністю досить щільно прилягають один до одного, так що їхню внутрішню поверхню можна вважати суцільною й ідеально провідною. У витках біфілярної обмотки з металеві стрічки протікає гармонічний струм.

На підставі розрахункових співвідношень для напруженостей збуджених полів отримані числові оцінки характеристик електромагнітних процесів. Проведено аналіз випадку, коли струми в кожній з гілок-жил біфіляра спрямовані в протилежні сторони. Розглянуто різновиди поперечних і поздовжніх розмірів системи, а також варіанти підключення однієї або двох обмоток біфіляра. Показано, що інтегральний магнітний потік у внутрішній порожнині цієї системи, незалежно від її конструктивних особливостей, дорівнює нулю і, відповідно, індуктивність усієї системи в цілому рівна нулю. Магнітний потік в системі з біфіляром сконцентрований в порожнині між обмотками, що пояснюється позитивною суперпозицією односпрямованих векторів індукції збуджених полів. Зміни геометрії й кількості компонентів дозволяють варіювати характеристики радіальних розподілів електромагнітних полів в розглянутій індукторній системі.

Отримані числові оцінки для характеристик збуджених магнітних полів в реальній і вперше запропонованій в роботі конструкції індукторної системи будуть корисні для вибору робочих конструкторських рішень нових схем обладнання магнітно-імпульсної обробки металів. Запропонована методика аналізу дозволить провести відповідні експериментальні дослідження, а також розрахунок і аналіз електромагнітних процесів в індукторних системах, де біфілярні котушки розміщують над циліндричними соленоїдами, що є вельми цікавим під час формування нових схем обладнання для магнітно-імпульсної обробки металів.

Ключові слова: коаксіальний соленоїд, індукторна система, магнітний потік, обладнання для магнітно-імпульсної обробки металів.

Вступ

Електрофізичні властивості біфілярних котушок використовуються як один зі способів створення дротяних резисторів з незначною індуктивністю, як елементи релейних пристроїв і трансформаторів, у вигляді компонентів силової електроніки тощо [1]. Наразі в різних сферах науки і техніки широко застосовуються магнітно-імпульсні пристрої (МІП), зокрема для обробки металів, що характеризуються високою продуктивністю, можливістю легкої автоматизації і механізації технологічного процесу й широкими технологічними можливостями. Розробка таких пристроїв становить як теоретичний, так і практичний інтерес. Одним з варіантів індукторних систем таких

пристроїв є система з використанням біфілярних котушок [5]. Згідно з конструктивними рішеннями біфілярні котушки можуть розміщуватися як усередині, так і поза багатовитковими індукторами — інструментами силового впливу.

Як відомо, циліндричні біфілярні котушки складаються з двох коаксіальних протяжних соленоїдів з однаковим намотуванням. Соленоїди розміщуються один в одному так, щоб відповідні витки обмоток знаходилися в одній вертикальній площині. В обмотках коаксіальних соленоїдів, що є гілками запропонованої біфілярної конструкції, рівні струми можуть протікати як в одному й тому ж, так і в протилежному напрямках. У разі односпрямованих струмів суперпозиція збуджених полів дає нульовий магнітний потік у порожнині між обмотками соленоїдів. Якщо ж струми спрямовані протилежно, напруженість магнітного поля перетворюється в нуль усередині і поза біфілярною котушкою.

Розрахунками електромагнітних полів соленоїдів різної геометрії займаються чимало авторів, наприклад [2]—[5]. Так, у роботі [2] використовуються методи теорії електричних ланцюгів. У роботі [3] подано числові методи розрахунку. Авторами робіт [4], [5] за допомогою адекватних фізико-математичних моделей реалізуються аналітичні методи розв'язання крайових задач математичної фізики, де для типових конфігурацій соленоїдів — інструментів у магнітно-імпульсній обробці металів визначені просторово-часові розподілення збуджених полів та індукованих струмів. Обчислені фундаментальні характеристики експериментальних зразків різного конструктивного виконання.

В роботі [6] уперше запропонована циліндрична конструкція системи з біфіляром, розташованим усередині індуктора. На основі адекватної фізико-математичної моделі авторами цитованої роботи отримані розрахункові вирази для напруженостей збуджених полів, що дозволяє провести аналіз електромагнітних процесів, які відбуваються, і отримати числові оцінки для експериментальних зразків індукторних систем з біфілярними складовими.

Метою роботи є теоретичний аналіз і отримання числових оцінок характеристик електромагнітних процесів у циліндричній індукторній системі, що збуджуються різноспрямованими струмами в обмотках біфіляра. Кінцевою метою комплексу досліджень є теоретичне і експериментальне обґрунтування практичної працездатності запропонованої індукторної системи.

Результати дослідження

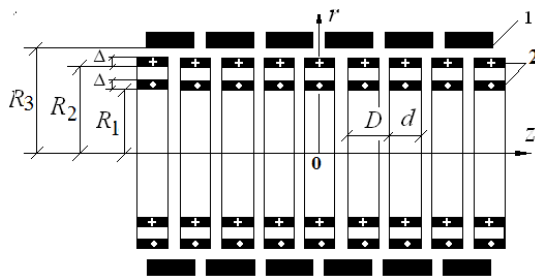


Рис. 1. Розрахункова модель індукторної системи з внутрішньої біфілярною обмоткою: 1 — зовнішній індуктор з внутрішнім радіусом R_3 ; 2 — внутрішня біфілярна обмотка: R_1, R_2 — радіуси внутрішньої і зовнішньої частин біфіляра, D — крок намотування, d — ширина витків біфіляра

2. У біфілярі протікає гармонічний струм з густиною

$$j_{\varphi}(t, r, z) = j_m \cdot \sin(\omega t) \cdot f(r) \cdot g(z), \quad (1)$$

де $j_m = J_m/(d \Delta)$ — амплітуда густини струму, J_m — амплітуда струму, ω — циклічна частота, $f(r), g(z)$ — функції відповідно радіального й поздовжнього розподілів густини струму, визначених у роботі [6], а саме

$$g(z) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n^* \cdot \cos(\Omega_n \cdot z); \quad a_n^* = \begin{cases} \frac{d}{2D}, & n=0, \\ \frac{2}{\pi n} \cdot \sin\left(\pi n \cdot \frac{d}{D}\right), & n=1, 2, 3, \dots \end{cases}$$

$$f(r) = \begin{cases} 1, & r \in [R_1, (R_1 + \Delta)] \cup [R_2, (R_2 + \Delta)], \\ 0, & r \notin [R_1, (R_1 + \Delta)] \cup [R_2, (R_2 + \Delta)]. \end{cases}$$

Скористаємося аналітичними залежностями, виведеними в роботі [6]. Оскільки принципова дієвість біфіляра в запропонованій індукторній системі передбачає віднімання магнітних потоків поза гілками обмоток і їхнє складання в порожнині між ними, обмежимося виразом (11) роботи [6] для магнітного потоку в часовому максимумі $t = \pi/2\omega$, усередненим за періодом поздовжньої координати $z[-D/2, +D/2]$, крізь довільну поверхню $r [r_1, r_2]$.

$$\text{Тобто} \quad \Phi(r_1, r_2) = 4\pi\mu_0 \left(\frac{J_m}{\Delta} \right) \left(\frac{R_3^3}{D} \right) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{F(m, R_{1,2}) \cdot G(m, r_{1,2})}{\beta_m^2 J_2^2(\beta_m)}, \quad (2)$$

де $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнітна стала (магнітна проникність вакууму), β_m — корені рівняння $J_1(\beta_m) = 0$, $m = 1, 2, 3, 4, \dots$, $J_{1,2}(\beta_m)$ — функції Бесселя першого роду [7],

$$F(m, R_{1,2}) = \begin{pmatrix} \int_{\left(\beta_m \frac{R_1}{R_3}\right)}^{\left(\beta_m \frac{R_1 + \Delta}{R_3}\right)} x \cdot J_1(x) dx - \int_{\left(\beta_m \frac{R_2}{R_3}\right)}^{\left(\beta_m \frac{R_2 + \Delta}{R_3}\right)} x \cdot J_1(x) dx \\ \left(\beta_m \frac{R_1}{R_3}\right) & \left(\beta_m \frac{R_2}{R_3}\right) \end{pmatrix};$$

$$G(m, r_{1,2}) = \left(\frac{r_2}{R_3}\right) \cdot J_1\left(\beta_m \frac{r_2}{R_3}\right) - \left(\frac{r_1}{R_3}\right) \cdot J_1\left(\beta_m \frac{r_1}{R_3}\right).$$

Проаналізувавши залежність (2), дійшли висновків.

1. Величина і напрям магнітного потоку крізь будь-яку довільно виділену поверхню в цій системі визначається множителем $G(m, r_{1,2})$.

2. У центральній порожнині обмотки біфіляра, де $r \in [0, R_1]$, $G(m, r_{1,2}) = \left(\frac{R_1}{R_3}\right) \cdot J_1\left(\beta_m \frac{R_1}{R_3}\right)$, а в порожнині, де $r \in [R_1, R_2] \cap [R_2, R_3]$, $G(m, r_{1,2}) = -\left(\frac{R_1}{R_3}\right) \cdot J_1\left(\beta_m \frac{R_1}{R_3}\right)$. Отже, магнітні потоки у виді-

лених порожнинах повинні бути рівними за величиною і протилежно спрямованими.

3. У порожнині між обмотками біфіляра, де $r \in [R_1, R_2]$, величина і напрям магнітного потоку залежать від співвідношення алгебраїчних доданків виразу для $G(m, r_{1,2})$.

4. Інтегральний магнітний потік у внутрішній порожнині всієї розглянутої системи, де $r \in [0, R_3]$, як результат суперпозиції всіх його складових, дорівнює нулю, позаяк $G(m, r_{1,2}) \Big|_{r_1=0, r_2=R_3} = 0$.

5. Рівність нулю інтегрального магнітного потоку означає, що індуктивність системи також дорівнює нулеві.

Далі, за допомогою формули (2) проведемо обчислення магнітних збуджених потоків в експериментальних варіантах досліджуваної індукторної системи у разі збільшення відстані між обмотками біфіляра.

Для кількісного порівняння результати обчислень виразимо у відносних одиницях, нормованих на максимальні значення потоків у кожній експериментальній конструкції. Струми в обмотках біфіляра однакові, їхні напрями різні й відповідають схемі на рис. 1.

Розглянемо *варіант № 1* за такою геометрією системи:

– радіальні розміри — $R_1 = 0,0295$ м; $R_2 = 0,0335$ м; $R_3 = 0,0375$ м;

– поздовжні розміри — $d = 0,002$ м; $D = 0,004$ м.

У табл. 1—3 подано результати обчислень для різних випадків увімкнень обмоток біфіляра.

Таблиця 1

Увімкнення обох обмоток біфіляра

Виділені порожнини	$r \in [0, R_1]$	$r \in [R_1, R_2]$	$r \in [R_2, R_3]$
Магнітний потік з нормуванням на абсолютний максимум	0,396	-1	0,604

Таблиця 2

Увімкнення зовнішньої обмотки біфіляра під час вимкнення внутрішньої

Виділені порожнини	$R \in [0, R_2]$	$R \in [R_2, R_3]$
Магнітний потік з нормуванням на абсолютний максимум	0,496	-0,496

Таблиця 3

Увімкнення внутрішньої обмотки біфіляра під час вимкнення зовнішньої

Виділені порожнини	$R \in [0, R_2]$	$R \in [R_2, R_3]$
Магнітний потік з нормуванням на абсолютний максимум	0,406	-0,406

Бачимо, що максимум величини збудженого потоку знаходиться в центральній порожнині системи; відмінність знаків відповідає різним напрямкам збуджених потоків. Тут і далі нормування на максимум розраховується у разі увімкнення обох обмоток біфіляра.

Для *варіанта № 2* виберемо таку геометрію системи:

– радіальні розміри — $R_1 = 0,0245$ м; $R_2 = 0,0335$ м; $R_3 = 0,0375$ м;

– поздовжні розміри — $d = 0,002$ м; $D = 0,004$ м.

Результати обчислень магнітного потоку для цього випадку подано в табл. 4.

Таблиця 4

Увімкнення обох обмоток біфіляра

Виділені порожнини	$R \in [0, R_1]$	$R \in [R_1, R_2]$	$R \in [R_2, R_3]$
Магнітний потік із нормуванням на абсолютний максимум	0,373	-1	0,621

Зазначимо, що розрахунки формули (2) отримані за умови, що сума ряду Фур'є–Бесселя в (11) з точністю до $\sim 5\%$ обчислена з урахуванням 500 доданків.

З наведених числових даних для другого варіанта випливає, що максимум величини збудженого потоку, як і для першого варіанта, міститься в центральній порожнині системи. Відношення абсолютних максимумів потоків для першого і другого варіантів цієї індукторної системи складає величину $\Phi_{1\max}/\Phi_{2\max} \approx 1,15$.

Висновки

1. Проведено розрахунок й аналіз характеристик електромагнітних процесів у циліндричній індукторній системі з внутрішнім коаксіальним соленоїдом, обмотка якого виконана у вигляді біфіляра так, що струми в кожній з його жил спрямовані в протилежні сторони.

2. Показано, що інтегральний магнітний потік у внутрішній порожнині цієї системи, незалежно від її конструктивних особливостей, дорівнює нулю, відповідно, індуктивність системи також дорівнює нулеві. Це підкреслює відповідність вибраної математичної моделі реальній фізичній системі.

3. Максимум потоку в системі з біфіляром завжди міститься в порожнині між обмотками, що пояснюється суперпозицією односпрямованих векторів індукції магнітних полів, збуджених різноспрямованими струмами в обмотках біфіляра.

4. Індукторна система із застосуванням біфіляра є більш варіативною, оскільки дозволяє одержувати різні значення величини магнітного потоку під час увімкнення обох обмоток біфіляра або внутрішньої чи зовнішньої окремо. Розглянуті приклади геометрії індукторної системи дають змогу оцінити таку варіативність запропонованої конструкції. Так, наприклад, зменшення радіуса внутрішньої обмотки біфіляра на 17% приводить до зменшення магнітного потоку в області $r \in [0, R_1]$ на 5,8% і збільшення — на 2,8% в області $r \in [R_2, R_3]$.

5. Запропонований алгоритм розрахунку характеристик магнітних полів у розглянутій індукторній системі може застосовуватися для розробки нових схем обладнання магнітно-імпульсної обробки металів.

Робота виконана в Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті в межах науково-дослідної роботи за держбюджетною темою № 08-53-19: «Енергозберігаючі маловитратні технології створення та ремонту гібридних транспортних засобів різного призначення», а саме, другого їхнього напрямку, що виконується кафедрою фізики ХНАДУ: «Енергозберігаючі маловитратні технології живлен-

ня та ремонту транспортних засобів», які є складовою частиною наукової тематики, що розвивається в університеті.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] В. Г. Герасимов, Э. В. Кузнецов, О. В. Николаева, *Электротехника и электроника. Электрические и магнитные цепи*, Москва: Энергоатомиздат, 1996, 288 с.
- [2] Г. И. Атабеков, *Основы теории цепей*, С-Пб, Россия: Энергия, 2006, 220 с.
- [3] А. Д. Подольцев, И. Н. Кучерявая, *Элементы теории и численного расчёта электромагнитных процессов в ферромагнитных средах*, Киев, Украина: изд. Ин-та электродинамики НАНУ, 1999, 362 с.
- [4] G. A. Shneerson, M. I. Dolotenko, and S. I. Krivosheev, *Strong and Superstrong Pulsed Magnetic Field Generation*. Berlin: Walter de Gruyter, 2014.
- [5] Y. Batygin, M. Barbashova, O. Sabokar, *Electromagnetic Metal Forming for Advanced Processing Technologies*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing AG, 2018, 93 p.
- [6] Ю. В. Батыгин, А. Ю. Бондаренко, С. А. Шиндерук, Г. С. Сериков. «Расчётные соотношения для цилиндрической индукторной системы с внутренним бифилярным соленоидом,» *Вісник НТУ ХПІ, Серія: Техніка та електрофізика високих напруг*, № 18 (1343), с. 8-12, 2019.
- [7] Г. Корн, Т. Корн, *Справочник по математике*, Москва: Наука, 1973, 831 с.
- [8] Б. М. Яворский, А. А. Детлаф, А. К. Лебедев, *Справочник по физике для инженеров и студентов ВУЗов*. 8-е изд., перераб. и испр., Москва, Россия: ООО «Издательство Оникс», ООО «Издательство «Мир и Образование», 2006, 1056 с.

Рекомендована кафедрою теоретичної електротехніки та електричних вимірювань ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 26.09.2019

Батыгин Юрій Вікторович — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри фізики, e-mail: yu.v.batygin@gmail.com ;

Чапльгин Евгений Александрович — канд. техн. наук, доцент кафедри фізики, e-mail: chaplygin.e.a@gmail.com ;

Гаврилова Тетяна Володимирівна — канд. ф.-мат. наук, доцент кафедри фізики, e-mail: gavriloVA.tatyana@i.ua ;

Шиндерук Світлана Олександрівна — канд. техн. наук, доцент кафедри фізики, e-mail: s.shinderuk.2016102@ukr.net ;

Коваленко Дмитро Анатолієвич — студент механічного факультету, e-mail: kovalenkodima406@gmail.com. Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків

Yu. V. Batyhin¹
Ye. O. Chaplyhin¹
S. O. Shynderuk¹
T. V. Havrylova¹
D. A. Kovalenko¹

Cylindrical Inductor System with Internal Bifilar Solenoid. Analysis of Electromagnetic Characteristics

¹Kharkiv National Automobile and Highway University

A cylindrical inductor system with an internal coaxial solenoid, the winding of which is made in the form of a bifilar, is considered. The physical and mathematical model of the proposed system assumes the working conditions when the external inductor is turned off, its turns are made of metal with high electrical conductivity; sufficiently close to each other, so that their inner surface can be considered a continuous surface of the ideal conductor. The coils of the bifilar winding are made of metal tape and do not affect the occurring electromagnetic processes. A harmonic current flows in the bifilar.

Based on the calculated ratios for the strengths of the fields excited in the system, numerical estimates of the characteristics of the electromagnetic processes are obtained.

The case when the currents in each of the branches of the bifilar which directed in opposite directions is analyzed. Various cases of the transverse and longitudinal dimensions of the system are considered, as well as options for connecting one or two bifilar coils. It is shown that the integral magnetic flux in the internal cavity of the system under consideration, regardless of its design features, is zero and, accordingly, the inductance of the entire system as a whole is zero. The concentration of the magnetic flux in the system with a bifilar takes place in the cavity between its windings, which is explained by the positive superposition of the unidirectional induction vectors of the excited fields. Changes in the geometry and number of components allow varying the indices of the radial distributions of electro-magnetic fields in the inductor system considered. The obtained numerical estimates for the characteristics of magnetic fields excited in inductor system, real design first proposed by the authors, excited by directed in opposite directions currents in the windings of the bifilar, will be useful in choos-

ing working design solutions for the corresponding elements of magnetic pulse metal processing equipment.

The proposed method of analysis will also allow appropriate experimental studies, as well as calculation and analysis of electromagnetic processes in inductor systems, where bifilar coils are placed on top of cylindrical solenoids, which is very interesting for the formation for new equipment magnetic-pulse processing of metal.

Keywords: coaxial solenoid, inductor system, magnetic flux, equipment for magnetic-pulse metal processing.

Batyhin Yurii V. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Physics, e-mail: yu.v.batygin@gmail.com ;

Chaplyhin Yevhenii O. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of Chair of the Physics, e-mail: chaplygin.e.a@gmail.com ;

Shynderuk Svitlana O. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Physics, e-mail: s.shynderuk.2016102@ukr.net ;

Havrylova Tetiana V. — Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Chair of Physics, e-mail: gavrilovala.tatyana@i.ua ;

Kovalenko Dmytro A. — Student, of Mechanical Department, e-mail: kovalenkodima406@gmail.com

Ю. В. Батыгин¹
Е. А. Чаплыгин¹
С. А. Шиндерук¹
Т. В. Гаврилова¹
Д. А. Коваленко¹

Цилиндрическая индукторная система с внутренним бифилярным соленоидом. Анализ электромагнитных характеристик

¹Харьковский автомобильно-дорожный университет

Рассмотрена цилиндрическая индукторная система с внутренним коаксиальным соленоидом, обмотка которого выполнена в виде бифиляра. Физико-математическая модель предложенной системы предполагает условия работы, когда внешний индуктор отключён, его витки выполнены из металла с высокой электропроводностью; достаточно плотно прилегают друг к другу, так что их внутреннюю поверхность можно считать сплошной поверхностью из идеального проводника. Витки бифилярной обмотки выполнены из металлической ленты и не влияют на протекающие электромагнитные процессы. В бифиляре протекает гармонический ток. На основании расчётных соотношений для напряжённостей возбуждаемых в системе полей получены численные оценки характеристик электромагнитных процессов.

Проведен анализ случая, когда токи в каждой из ветвей-жил бифиляра направлены в противоположные стороны. Рассмотрены различные случаи поперечных и продольных размеров системы, а также варианты подключения одной или двух обмоток бифиляра. Показано, что интегральный магнитный поток во внутренней полости рассматриваемой системы вне зависимости от её конструктивных особенностей равен нулю и, соответственно, равна нулю индуктивность всей системы в целом. Концентрация магнитного потока в системе с бифиляром имеет место в полости между его обмотками, что объясняется суперпозицией однонаправленных векторов индукции возбуждаемых полей. Изменения геометрии и количества компонент позволяет варьировать показатели радиальных распределений электромагнитных полей в предложенной индукторной системе.

Полученные численные оценки для характеристик магнитных полей, возбуждаемых в реальной и впервые предложенной конструкции индукторной системы, возбуждаемой токами, текущими в противоположных направлениях в обмотках бифиляра, будут полезны при выборе рабочих конструкторских решений для соответствующих элементов новых схем оборудования магнитно-импульсной обработки металлов. Предложенная методика анализа позволит провести также соответствующие экспериментальные исследования, а также расчёт и анализ электромагнитных процессов в индукторных системах, где бифилярные катушки размещают поверх цилиндрических соленоидов, что является весьма интересным для формирования новых схем оборудования для магнитно-импульсной обработки металлов.

Ключевые слова: коаксиальный соленоид, индукторная система, магнитный поток, оборудование для магнитно-импульсной обработки металлов.

Батыгин Юрий Викторович — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой физики, e-mail: yu.v.batygin@gmail.com ;

Чаплыгин Евгений Георгий Александрович — канд. техн. наук, доцент кафедры физики, e-mail: chaplygin.e.a@gmail.com ;

Шиндерук Светлана Александровна — канд. техн. наук, доцент кафедры физики, e-mail: s.shynderuk.2016102@ukr.net ;

Гаврилова Татьяна Владимировна — канд. ф.-мат. наук, доцент кафедры физики, e-mail: gavrilovala.tatyana@i.ua ;

Коваленко Дмитрий Анатольевич — студент механического факультета, e-mail: kovalenkodima406@gmail.com