

Ю.В. Батигін, д.т.н., проф.
С.О. Шиндерук, к.т.н., доц.
М.А. Волосюк, к.ф.-м.н., доц.
Є.О. Чаплигін, к.т.н., доц.
М.М. Бондаренко, студ.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Електромагнітні поля у плоскій індукторній системі з масивними біфілярними котушками

Вперше запропоновано плоску індукторну систему, де багатовитковий соленоїд-індуктор розміщується між гілками масивної біфілярної котушки, що дозволяє знизити розсіювання електромагнітної енергії за мінімально можливого впливу її поля на електромагнітні процеси в соленоїд-індукторі. В межах прийнятих припущень про досить високу провідність обмоток біфіляра, що практично реалізується в області відповідно досить високих робочих частот електромагнітних процесів, знайдено розрахункові співвідношення для аналізу й чисельної оцінки збуджуваних полів і струмів у запропонованій індукторній системі. Визначено, що ефективність збудження струму в обмотках біфіляра мало залежить від відстані між індуктором і біфіляром, радіальний розподіл індукваного струму є практично рівномірним і вплив збуджуваного магнітного поля на процеси власне в індукторі має бути досить несуттєвим. Результати проведеного аналізу й обчислень для експериментальної моделі дозволяють зробити висновок про практичну працездатність вперше запропонованої індукторної системи, що збуджується плоским круговим соленоїдом, розміщеним між масивними обмотками біфіляра.

Ключові слова: електромагнітні процеси; плоска індукторна система; біфілярна котушка; соленоїд-індуктор.

Актуальність теми. Котушка є біфілярною (або просто біфіляром), якщо її намотування представлено двома паралельними ізольованими один від одного дротами. Слово «bifilar» можна перекласти з англійської як «двонитковий», «двожилний» або «дводрововий», тому в загальному випадку «біфілярне намотування» – це намотування, виконане ізольованим двожилним дротом. У разі плоского варіанту біфіляр може бути виконаний у вигляді двох окремих однакових паралельних обмоток, розміщених одна на іншій. Така конструкція дозволяє реалізувати дві основні фізичні ситуації. Перша з них передбачає протікання в обмотках протилежно спрямованих струмів. В цьому випадку магнітне поле поза біфіляром наближається до нуля. Друга фізична ситуація трапляється під час протікання в обмотках біфіляра односпрямованих струмів. У цьому випадку має місце нульова напруженість вже між обмотками біфіляра. Та чи інша фізична реалізація визначає відповідне практичне застосування. Наприклад, нульове зовнішнє або внутрішнє магнітне поле в електричних перетворювачах дозволяє реалізувати мінімальний зворотний вплив вторинного контуру з навантаженням на первинний контур з джерелом живлення.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори. Як свідчать спеціальні літературні джерела, історично перші біфілярні котушки були названі ім'ям їх винахідників. Це «котушка Айртона – Перрі» і «котушка Ніколи Тесла» [1–3]. Вперше застосування «котушки Айртона – Перрі» було надано в описі патенту на транспортний засіб з електричною тягою [1]. Плоска біфілярна котушка була запропонована Ніколою Тесла в електричних ланцюгах як елемент, що дозволив відмовитися від дорогих конденсаторів [2, 3]. Не зупиняючись на відомих традиційних застосуваннях біфілярних котушок (для створення дротяних резисторів з досить малою індуктивністю, для генерації магнітних імпульсів будь-якої форми, для усунення небажаних резонансів у радіотехнічних пристроях тощо), досить докладно описаних, наприклад, в [1], слід зазначити останні приклади використання біфілярів – мова йде про схеми надпровідних обмежувачів струму [4].

Детальним розробкам чисельних і аналітичних методів розрахунку електромагнітних процесів у котушках різної геометрії, що розглядаються як джерела сильних і надсильних полів, присвячені роботи [5–13]. Для схем обладнання магнітно-імпульсної обробки металів [14, 15] практичний інтерес мають дослідження плоских індукторних систем, де багатовитковий соленоїд-індуктор розміщується між гілками біфілярної котушки, що дозволяє знизити розсіювання електромагнітної енергії за мінімально можливого впливу її поля на електромагнітні процеси в соленоїд-індукторі.

Метою статті є отримання аналітичних залежностей, теоретичний аналіз та оцінка характеристик електромагнітних процесів у запропонованій плоскій індукторній системі, що складається з тонкого соленоїда-індуктора, розміщеного між гілками біфіляра – масивними багатовитковими котушками з добре провідного металу.

Викладення основного матеріалу. Наукова новизна полягає в пропозиції конструктивного виконання, отриманні аналітичних залежностей для характеристик індукційних процесів і теоретичного аналізу електромагнітних процесів у плоскій індукторній системі, що складається із соленоїда-індуктора й біфілярної котушки. Кінцевою метою комплексу проведених досліджень є теоретичне і експериментальне обґрунтування практичної працездатності запропонованої індукторної системи.

Під час вирішення поставленого завдання приймемо такі припущення.

- Фізико-математична модель запропонованої індукторної системи представлена на рисунку 1.

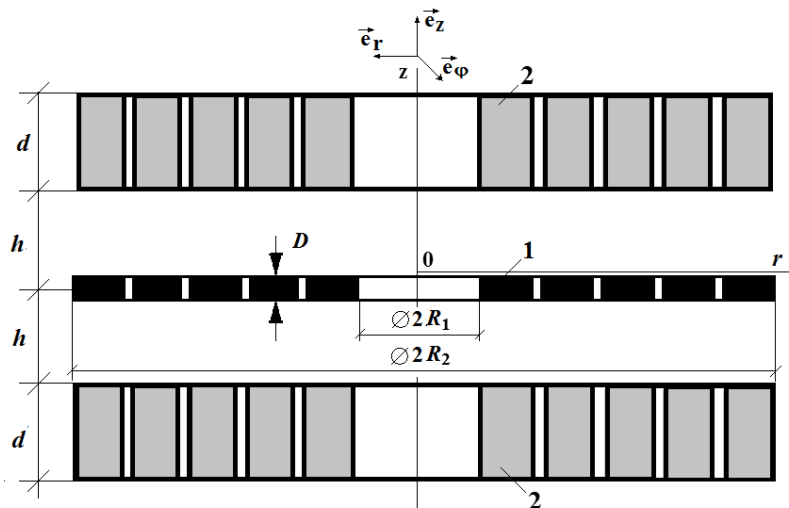


Рис. 1. Розрахункова модель індукторної системи:

1 – плоский багатовитковий соленоїд-індуктор; 2 – гілки біфіляра – плоскі багатовиткові соленоїди

- У прийнятій циліндричній системі координат об’єкт дослідження має аксіальну симетрію, так що $\frac{\partial}{\partial \varphi} = 0$, де φ – азимутальний кут.

- Відстані між соленоїдом-індуктором і гілками обмотки біфіляра досить малі, так що $h \ll R_{1,2}$ ($R_{1,2}$ – внутрішній і зовнішній радіуси обмотки індуктора-соленоїда), що дозволяє знехтувати крайовими ефектами.

- Витки біфілярної котушки досить масивні ($d \gg R_{1,2}$) і виконані з металу з високою електропровідністю, вони щільно прилягають один до одного, так що їх поверхню з боку індуктора-соленоїда можна вважати суцільною поверхнею з ідеального провідника.

- Витки соленоїда-індуктора виконані з тонкої металевої стрічки ($D \ll R_{1,2}$, де D – товщина, $R_{1,2}$ – внутрішній і зовнішній радіуси обмотки), щільно прилягають один до одного, «прозорі» для збуджуваних полів (так що $\frac{D}{\Delta} \ll 1$, де Δ – величина скін-шару) і не впливають на електромагнітні процеси, що протікають [14, 15, 17, 18].

- У соленоїді-індукторі протікає гармонічний струм густини: $j_{\varphi}(t, r, z) = j_m \cdot \sin(\omega t) \cdot f(r) \cdot \delta(z)$,

де $j_m = \frac{I_m}{(R_2 - R_1)}$ – амплітуда густини струму, I_m – амплітуда струму, ω – циклічна частота, $f(r)$, $\delta(z)$ – функції радіального і поздовжнього розподілів, $\delta(z)$ – дельта-функція Дірака [16].

- Часові параметри збуджуючого струму задовольняють квазістаціонарне наближення по Ландау $\frac{\omega}{c} \cdot \ell \ll 1$ [9, 10], де c – швидкість світла у вакуумі, ℓ – максимальний розмір в системі.

Рівняння Максвелла ($E_{\varphi} \neq 0, H_{r,z} \neq 0$) для складових вектора електромагнітного поля, що збуджується, перетворених за Лапласом з урахуванням нульових початкових умов, мають вигляд [14–16]:

$$\begin{cases} \frac{\partial H_r(p, r, z)}{\partial z} - \frac{\partial H_z(p, r, z)}{\partial r} = j_{\varphi}(p, r, z); & (1) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot E_{\varphi}(p, r, z)) = -\mu_0 \cdot p \cdot H_z(p, r, z); & (2) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{\partial E_{\varphi}(p, r, z)}{\partial z} = \mu_0 \cdot p \cdot H_r(p, r, z); & (3) \end{cases}$$

де p – параметр перетворення Лапласа;

$$E_{\varphi}(p, r, z) = L\{E_{\varphi}(t, r, z)\}; H_{r, z}(p, r, z) = L\{H_{r, z}(t, r, z)\}; j_{\varphi}(p, r, z) = L\{j_{\varphi}(t, r, z)\},$$

$j_{\varphi}(t, r, z)$ – густина струму в біфілярі.

З диференціальних рівнянь (1–3) в межах прийнятих припущень (нехтуючи струмами зміщення) отримаємо рівняння для азимутальної компоненти напруженості електричного поля $E_{\varphi}(p, r, z)$ у визначених областях:

$$\frac{\partial^2 E_{\varphi}(p, r, z)}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot E_{\varphi}(p, r, z)) \right) = \mu_0 \cdot p \cdot j_{\varphi}(p, r, z) \quad (4)$$

З урахуванням кінцевості дотичної компоненти напруженості електричного поля на нескінченності рішення рівняння (4) можна шукати як інтеграл Фур'є-Бесселя [16]:

$$E_{\varphi}(p, r, z) = \int_0^{\infty} E_{\varphi}(p, \lambda, z) \cdot J_1(\lambda r) \lambda d\lambda, \quad (5)$$

де $J_1(\lambda r)$ – функція Бесселя першого роду першого порядку, λ – параметр інтегрального перетворення.

Підставляючи інтеграл (5) в (4), отримуємо звичайне лінійне неоднорідне диференціальне рівняння другого порядку щодо змінної z [16]:

$$\frac{d^2 E_{\varphi}(p, \lambda, z)}{dz^2} - \lambda^2 \cdot E_{\varphi}(p, \lambda, z) = K(p, \lambda) \cdot \delta(z), \quad (6)$$

де $K(p, \lambda) = \mu_0 \cdot p \cdot j(p) \cdot f(\lambda)$, $f(\lambda) = \int_{R_1}^{R_2} f(r) \cdot J_1(\lambda r) \cdot r dr$.

Загальне рішення рівняння (14), що задовольняє умови симетрії відносно площини $z=0$, має вигляд [16]:

$$E_{\varphi}(p, \lambda, z) = A(p, \lambda) \cdot \text{ch}(\lambda z) + \frac{K(p, \lambda)}{\lambda} \cdot \text{sh}(\lambda z) \cdot (\eta(z) - 0,5), \quad (7)$$

де $A(p, \lambda)$ – довільна стала інтегрування, $\eta(z)$ – ступінчаста функція Хевісайда, $\eta(z) = \begin{cases} 0, & z < 0, \\ 1, & z \geq 0. \end{cases}$

Невідома довільна стала інтегрування в загальному інтегралі (7) знаходиться з умови рівності дотичної компоненти напруженості електричного поля на ідеально провідних поверхнях обмоток біфіляра:

$$A(p, \lambda) = - \frac{K(p, \lambda)}{2\lambda} \cdot \frac{\text{sh}(\lambda h)}{\text{ch}(\lambda h)}. \quad (8)$$

Підставляючи (8) в (7), отримуємо частинний розв'язок рівняння (6), яке задовольняє задані граничні умови в просторі зображень по Лапласу:

$$E_{\varphi}(p, \lambda, z) = \frac{K(p, \lambda)}{2\lambda} \cdot \left(\text{sh}(\lambda z) \cdot (2 \cdot \eta(z) - 1) - \frac{\text{sh}(\lambda h)}{\text{ch}(\lambda h)} \cdot \text{ch}(\lambda z) \right). \quad (9)$$

З рівняння (3) за допомогою формули (8) знаходимо зображення радіальної компоненти напруженості магнітного поля в L – просторі та просторі Фур'є-Бесселя.

$$H_r(p, \lambda, z) = \frac{1}{p\mu_0} \cdot \frac{K(p, \lambda)}{2} \left(\text{ch}(\lambda z) (2\eta(z) - 1) - \frac{\text{sh}(\lambda h)}{\text{ch}(\lambda h)} \text{sh}(\lambda z) \right). \quad (10)$$

Виконаємо в (9) обернені інтегральні перетворення [16]. З урахуванням раніше прийнятих позначень знаходимо, що

$$H_r(t, r, z) = \frac{j_m}{2} \sin(\omega t) \int_0^{\infty} f(\lambda) \left(\text{ch}(\lambda z) (2\eta(z) - 1) - \frac{\text{sh}(\lambda h)}{\text{ch}(\lambda h)} \text{sh}(\lambda z) \right) J_1(\lambda r) \lambda d\lambda. \quad (11)$$

Модуль лінійної густини струму, що збуджується в металі витків біфіляру, визначаємо з виразу (11):

$$j_i(r) = \frac{j_m}{2} \cdot \sin(\omega t) \cdot \int_0^{\infty} \frac{f(\lambda)}{\text{ch}(\lambda h)} \cdot J_1(\lambda r) \cdot \lambda d\lambda. \quad (12)$$

Аналітичні залежності для напруженостей збуджуваних електромагнітного поля і струмів, індукваних в біфілярі, описують процеси в запропонованій індукторній системі і повністю вичерпують завдання про отримання аналітичних залежностей для характеристик процесів, що протікають.

Із залежності (12) знаходимо радіальний розподіл часового максимуму густини індукваного струму відносно часового максимуму густини струму в індукторі. Після необхідних тотожних перетворень отримуємо залежність, зручну для чисельних оцінок.

$$\frac{j_{i\max}(r)}{j_m} = \frac{1}{2} \cdot \int_0^\infty \left(\int_{(\lambda R_1)}^{(\lambda R_2)} y \cdot J_1(y) dy \right) \cdot \frac{J_1(\lambda r)}{\lambda \cdot \text{ch}(\lambda h)} d\lambda \quad (13)$$

Інтегруючи густину збуджуваного струму по радіусу $r \in [R_1, R_2]$, можна знайти повний струм в кожній обмотці біфіляра. З нормуванням на амплітуду струму в індукторі отримуємо співвідношення, яке можна інтерпретувати як коефіцієнт трансформації за струмом в електричному перетворювачі «індуктор-біфіляр».

$$\frac{I_{i\max}}{I_m} = \frac{1}{2(R_2 - R_1)} \cdot \int_0^\infty \left(\int_{(\lambda R_1)}^{(\lambda R_2)} y \cdot J_1(y) dy \right) \cdot \frac{(J_0(\lambda R_1) - J_0(\lambda R_2))}{\lambda^2 \cdot \text{ch}(\lambda h)} d\lambda, \quad (14)$$

де $J_0(\lambda R_{1,2})$ – функція Бесселя першого роду нульового порядку [16].

За допомогою отриманих виразів проаналізуємо електромагнітні процеси в дослідженій індукторній системі. Почнемо з оцінки впливу полів біфіляра на струм в обмотці індуктора-соленоїда. Умовно оточимо обмотку індуктора-соленоїда замкнутим контуром $S: \left\{ z \in \left[-\frac{\Delta}{2}, +\frac{\Delta}{2} \right], r \in [R_1, R_2] \right\}$.

Інтеграл по цьому контуру від напруженості магнітного поля буде дорівнювати струму J_e , що збуджується власне цим магнітним полем. Якщо прийняти, що поперечний розмір досить малий і $\frac{\Delta}{R_{1,2}} \ll 1$, то інтегрування по контуру S зводиться до інтеграла по радіусу $r \in [R_1, R_2]$. На сторонах $\left\{ z = \pm \frac{\Delta}{2}, r \in [R_1, R_2] \right\}$, як свідчить вираз (11), напруженості збуджуваного магнітного поля будуть дорівнювати:

$$H_r \left(t, r, z = \pm \frac{\Delta}{2} \right) = \pm \frac{j_m}{2} \sin(\omega t) \int_0^\infty f(\lambda) \left(\text{ch} \left(\lambda \frac{\Delta}{2} \right) - \frac{\text{sh}(\lambda h)}{\text{ch}(\lambda h)} \text{sh} \left(\lambda \frac{\Delta}{2} \right) \right) J_1(\lambda r) \lambda d\lambda. \quad (15)$$

Інтегруючи (15), отримуємо, що:

$$J_e \approx \int_{R_1}^{R_2} \left(H_r \left(t, r, z = \frac{\Delta}{2} \right) + H_r \left(t, r, z = -\frac{\Delta}{2} \right) \right) dr = 0. \quad (16)$$

Результат (16) свідчить про те, що вплив збуджуваного магнітного поля на процеси в індукторі має бути досить несуттєвим.

Перейдемо до чисельних оцінок. На рисунках 2 і 3 представлено результати обчислень для експериментальної моделі досліджуваної індукторної системи: $R_1 = 0,015$ м, $R_2 = 0,09$ м, $h = 0,001 \dots 0,010$ м.

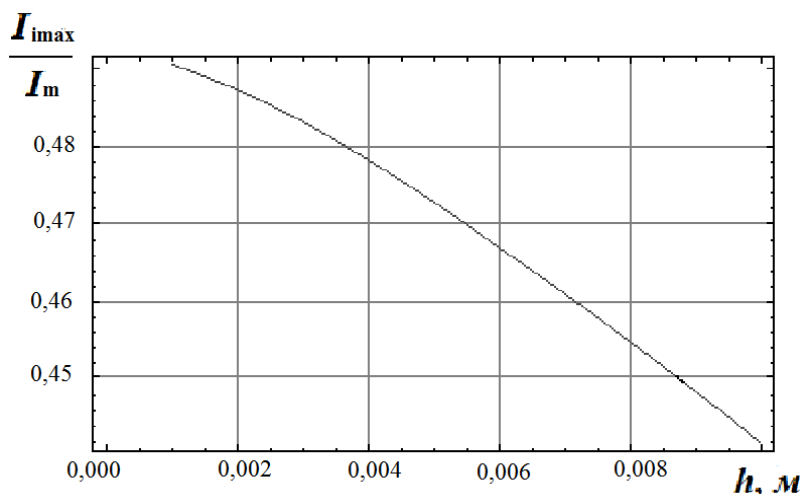


Рис. 2. Відношення струму в кожній обмотці біфіляра до струму індуктора залежно від відстані між ними

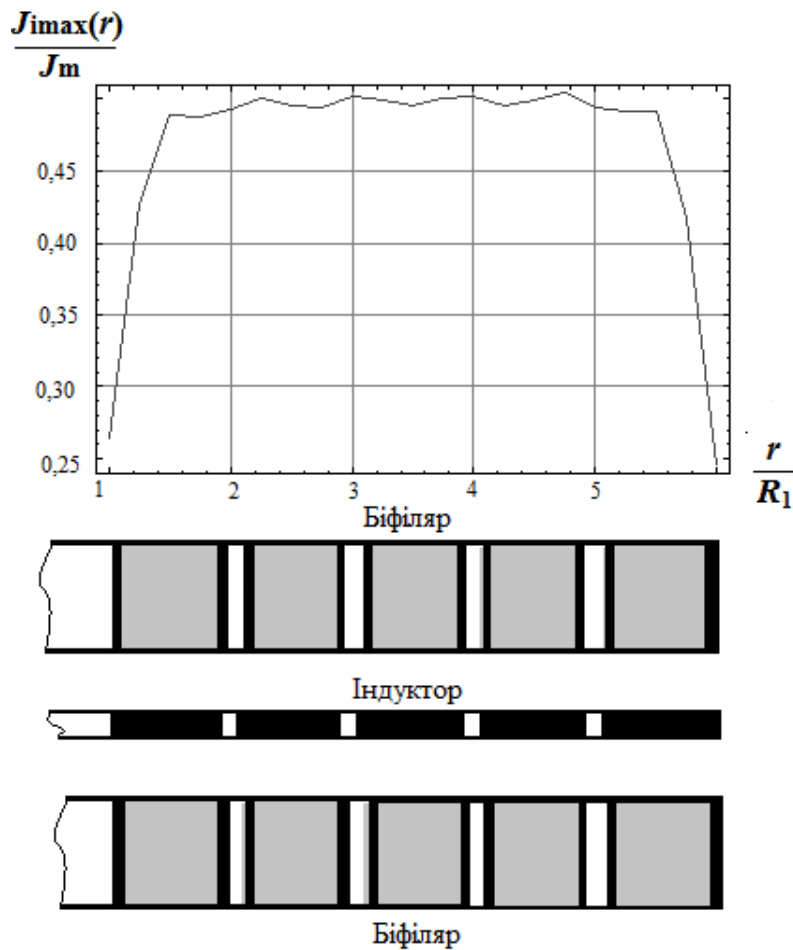


Рис. 3. Радіальний розподіл відносної амплітуди густини струму в кожній обмотці біфіляра, $h = 0,001$ м (нормування на амплітуду густини струму в індукторі)

Залежності на рисунках 2 і 3 показують, що:

- в діапазоні відстаней між індуктором і біфіляром $h = 0,001 \dots 0,010$ м амплітуда струму, індукованого в обмотці біфіляра, спадає не більше, ніж на $\sim 5\%$;
- має місце практично рівномірний радіальний розподіл густини індукованого струму.

Висновки та перспективи подальших досліджень.

1. Отримано розрахункові співвідношення для аналізу електромагнітних процесів у вперше запропонованій плоскій індукторній системі, що складається з досить тонкого соленоїда-індуктора, розміщеного між гілками біфіляра – масивними багатовитковими котушками з металу з високою питомою електропровідністю.

2. Проведений аналіз і чисельні оцінки характеристик електромагнітних процесів показали, що:

- вплив збуджуваного магнітного поля на процеси власне в індукторі має бути досить незначним;
- ефективність збудження струму в обмотці біфіляра мало залежить від відстані між індуктором і біфіляром;
- має місце практично рівномірний радіальний розподіл індукованого струму.

Подальші перспективи – теоретичні дослідження і чисельні оцінки з наступним переходом до експериментів для обґрунтування практичної дієздатності запропонованої індукторної системи.

Практична значущість: отримані результати можна використовувати під час вибору конструкторських рішень для елементів нових схем обладнання магнітно-імпульсної обробки металів.

Список використаної літератури:

1. Padamanabhan K. Electronic Components / K.Padamanabhan, P.Swaminathan. – Laxmi Publications, 2016. – 204 p. [Electronic resource]. – Access mode : <https://www.amazon.in/Electronic-Components-K-Padamanabhan/dp/8131807142>.
2. Tesla N. My Inventions: and Other Writings / N.Tesla. – New York : Dover Publ., 2016. – 144 p.

3. *Denicolai M.* Optimal performance for Tesla transformers / *M.Denicolai* // Review of Scientific Instruments. – 2002. – Vol. 73. – № 9. – pp. 3332–3336.
4. Novel Design of the Structure of a Non-Inductive Superconducting Coil / *M.C. Ahn, J.Y. Jang, T.K. Ko, H.Lee* // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2011. – Vol. 21, № 3. – pp. 1250–1253 [Electronic resource]. – Access mode : <https://ieeexplore.ieee.org/document/5675700>.
5. Безпосереднє збудження послідовного резонансного контуру прямокутними імпульсами напруги. Аналіз, чисельні оцінки / *Ю.В. Батюгін, Т.В. Гаврилова, С.О. Шиндерук та ін.* // Вісник ЖДТУ. – 2019. – № 1 (83). – С. 201–205.
6. *Подольцев А.Д.* Элементы теории и численного расчёта электромагнитных процессов в ферромагнитных средах / *А.Д. Подольцев, И.Н. Кучерявая.* – К. : Изд. Института электродинамики НАНУ, 1999. – 362 с.
7. *Shneerson G.A.* Strong and Superstrong Pulsed Magnetic Fields Generation / *G.A. Shneerson, M.I. Dolotenko, S.I. Krivosheev.* – Berlin : Walter de Gruyter, 2014. – 429 p.
8. *Hnatov A.* Energy saving technologies for urban bus transport / *A.Hnatov, Shch.Arhun, S.Ponikarovska* // International Journal of Automotive and Mechanical Engineering. – 2017. – Vol. 14, № 4. – P. 4649–4664.
9. Плоская индукторная система с массивными катушками бифиляра. Анализ электромагнитных процессов / *Ю.В. Батюгін, Т.В. Гаврилова, С.А. Шиндерук и др.* // Технічна інженерія. – 2019. – № 2 (84). – С. 115–119.
10. A Fundamental Study on Magnetic Pulse Forming with Bar Forming Coil / *J.-Y. Shim, B.Y. Kang, D.-H. Park, I.S. Kim* // Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 2011. – Vol. 20, № 3. – P. 292–297.
11. *Inanan G.* An Application of High-Power Electromagnetic Pulse: Forming of sheet metal using electromagnetic waves : Proc. 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), November 2015, Turkey, Bursa / *G.Inanan, B.Baranoglu, E.Aydin.* – P. 284–288.
12. Electromagnetic Forming – A Review / *V.Psyk, D.Rich, B.I. Kinsley et al.* // Journal of Material Processing Technology. – 2011. – № 211. – P. 787–829.
13. *Никищенко А.Н.* Разработка модели излучения плоской катушки / *А.Н. Никищенко, Н.В. Богач* // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций (РТ-2010). – Севастополь : Вебер, 2010. – С. 362–366.
14. *Батюгін Ю.В.* Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий / *Ю.В. Батюгін, В.И. Лавинский, Л.Т. Хименко.* – Харьков : МОСТ-Торнадо, 2003. – 284 с.
15. *Batygin Y.* Electromagnetic Metal Forming for Advanced Processing Technologies / *Y.Batygin, M.Barbashova, O.Sabokar* // Springer International Publishing AG (Switzerland), Part of Springer Nature, 2018. – 94 p.
16. *Корн Г.* Справочник по математике / *Г.Корн, Т.Корн.* – М. : Наука, 1973. – 831 с.
17. *Ландау Л.Д.* Электродинамика сплошных сред / *Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц.* – М. : Наука, 1982. – 620 с.
18. *Яворский Б.М.* Справочник по физике для инженеров и студентов ВУЗов / *Б.М. Яворский, А.А. Детлаф, А.К. Лебедев.* – М. : ООО «Издательство Оникс», ООО «Издательство «Мир и Образование», 2006. – 1056 с.

References:

1. Padamanabhan, K. and Swaminathan, P. (2016), *Electronic Components*, Laxmi Publications, 204 p., [Online], available at: <https://www.amazon.in/Electronic-Components-K-Padamanabhan/dp/8131807142>
2. Tesla, N. (2016), *My Inventions: and Other Writings*, Dover Publ., New York, 144 p.
3. Denicolai, M. (2002), «Optimal performance for Tesla transformers», *Review of Scientific Instruments*, Vol. 73, No. 9, pp. 3332–3336.
4. Ahn, M.C., Jang, J.Y., Ko, T.K. and Lee, H. (2011), «Novel Design of the Structure of a Non-Inductive Superconducting Coil», *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 21, No. 3, pp. 1250–1253, [Online], available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5675700>
5. Batygin, Ju.V., Gavrylova, T.V., Shynderuk, S.O. et al. (2019), «Bezposerednje zbudzhennja poslidovnoho rezonansnoho konturu prjamokutnymy impul'samy naprugy. Analiz, chysel'ni ocinky», *Visnyk ZhDTU*, No. 1 (83), pp. 201–205.
6. Podol'tsev, A.D. and Kucheryavaya, I.N. (1999), *Elementy teorii i chislennoho rascheta elektromagnitnykh protsessov v ferromagnitnykh seredakh*, Izd. Instituta elektrodinamiki NANU, K., 362 p.
7. Shneerson, G.A., Dolotenko, M.I. and Krivosheev, S.I. (2014), *Strong and Superstrong Pulsed Magnetic Fields Generation*, Walter de Gruyter, Berlin, 429 p.
8. Hnatov, A., Arhun, Shch. and Ponikarovska, S. (2017), «Energy saving technologies for urban bus transport», *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 4, pp. 4649–4664.
9. Batygin, Yu.V., Gavrilova, T.V. and Shinderuk, S.A. et al. (2019), «Ploskaya induktornaya sistema s massivnymi katushkami bifilyara. Analiz elektromagnitnykh protsessov», *Tekhnichna inzhenerija*, Vol. 84, No. 2, pp. 115–119.
10. Shim, J.-Y., Kang, B.Y., Park, D.-H. and Kim, I.S. (2011), «A Fundamental Study on Magnetic Pulse Forming with Bar Forming Coil», *Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, Vol. 20, No. 3, pp. 292–297.
11. Inanan, G., Baranoglu, B. and Aydin, E. (2015), «An Application of High-Power Electromagnetic Pulse: Forming of sheet metal using electromagnetic waves», *Proc. 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, November 2015, Bursa, Turkey, pp. 284–288.
12. Psyk, V., Rich, D., Kinsley, B.I. et al. (2011), «Electromagnetic Forming – A Review», *Journal of Material Processing Technology*, No. 211, pp. 787–829.
13. Nikishenko, A.N. and Bogach, N.V. (2010), «Razrabotka modeli izlucheniya ploskoi katushki», *Sovremennye problemy radiotekhniki i telekommunikatsii (RT-2010)*, Veber, Sevastopol', pp. 362–366.
14. Batygin, Yu.V., Lavinskii, V.I. and Khimenko, L.T. (2003), *Impul'snye magnitnye polya dlya progressivnykh tekhnologii*, MOST-Tornado, Khar'kov, 284 p.

15. Batygin, Yu., Barbashova, M. and Sabokar, O. (2018), «Electromagnetic Metal Forming for Advanced Processing Technologies», Springer International Publishing AG (Switzerland), Part of Springer Nature, 94 p.
16. Korn, G. and Korn, T. (1973), *Spravochnik po matematike*, Nauka, M., 831 p.
17. Landau, L.D. and Lifshits, E.M. (1982), *Elektrodinamika sploshnykh sred*, Nauka, M., 620 p.
18. Yavorskii, B.M., Detlaf, A.A. and Lebedev, A.K. (2006), *Spravochnik po fizike dlya inzhenerov i studentov VUZov*, ООО «Izdatel'stvo Oniks», ООО «Izdatel'stvo «Mir i Obrazovanie», M., 1056 p.

Батигін Юрій Вікторович – доктор технічних наук, професор кафедри фізики Харківського національного автомобільно-дорожнього університету.

<https://orcid.org/0000-0002-1278-5621>.

Наукові інтереси:

- електродинаміка;
- електротехніка.

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

Шиндерук Світлана Олександрівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри фізики Харківського національного автомобільно-дорожнього університету.

<https://orcid.org/0000-0002-6354-4174>.

Наукові інтереси:

- електродинаміка;
- електротехніка.

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

Волосюк Марина Андріївна – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики Харківського національного автомобільно-дорожнього університету.

<https://orcid.org/0000-0001-6615-3999>.

Наукові інтереси:

- електродинаміка;
- електротехніка;
- фізика конденсованого стану.

E-mail: marina_volosyuk@ukr.net.

Чаплигін Євген Олександрович – кандидат технічних наук, доцент кафедри фізики Харківського національного автомобільно-дорожнього університету.

<https://orcid.org/0000-0003-1448-6091>.

Наукові інтереси:

- електродинаміка;
- електротехніка.

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

Бондаренко Микита Михайлович – студент Харківського національного автомобільно-дорожнього університету.

Наукові інтереси:

- електродинаміка;
- електротехніка.

E-mail: anthlessly@gmail.com.

Стаття надійшла до редакції 26.03.2021.