

## ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПРОЦЕСИ В ПЛОСКІЙ КРУГОВІЙ СИСТЕМІ З ІНДУКТОРОМ МІЖ ТОНКИМИ КОТУШКАМИ БІФІЛЯРА

Ю.В. Батигін\*, докт.техн.наук, С.О. Шиндерук\*\*, канд.техн.наук, Є.О. Чаплигін\*\*\*, канд.техн.наук,  
О.Ф. Єрємін\*\*\*\*, канд.техн.наук  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,  
вул. Ярослава Мудрого, 25, Харків, 61002, Україна,  
e-mail: [s.shinderuk.2016102@ukr.net](mailto:s.shinderuk.2016102@ukr.net)

*Проведено аналіз електромагнітних процесів, що протікають в індукторній системі з біфілярною котушкою, а також чисельні оцінки характеристик збуджених струмів в умовах високої інтенсивності діючих полів. Задля вивчення електромагнітних процесів в тонкостінних обмотках біфіляра, на відміну від їхніх масивних реалізацій, застосовується строгий математичний підхід із застосуванням методів теорії електромагнітного поля. Чисельні оцінки проведено за допомогою отриманих аналітичних залежностей. Показано, що амплітуда струму, індукваного в біфілярній обмотці експериментальної моделі розглянутої індукторної системи, у відношенні до струму збудження не перевищує 10-15%, що значно менше можливого максимуму ~ 50%. Відзначено, що радіальний розподіл індукваного струму у біфілярній обмотці, на відміну від рівномірного розподілу струму збудження в індукторі, має зростаючий характер від внутрішнього до зовнішнього радіусу біфілярної обмотки. Отримані результати дають змогу оцінити рівень ефективності щодо вибору конструктивних рішень для нових елементів обладнання в магнітно-імпульсній обробці металів. Бібл. 11, рис. 3.*

**Ключові слова:** котушка біфіляра, плоска кругова індукторна система, магнітно-імпульсна обробка металів, перетворення енергії, соленоїд-індуктор.

**Вступ.** Відмітною особливістю біфілярних електротехнічних конструкцій є наявність паралельних близько розташованих провідників. Залежно від призначення в них можуть протікати одно- або протилежно спрямовані струми. Фізичними наслідками їхньої різноспрямованості є можливість отримання нульового магнітного поля у внутрішній порожнині між провідниками або в просторі поза ними. Практичні застосування біфілярних котушок як конструктивних елементів електротехнічних пристроїв є досить різноманітними. Найбільш відомими серед них є малоіндуктивні омичні опори, запобіжні струмообмежувальні пристрої, електронні системи, сенсорні датчики у вимірювальних комплексах та ін. [1].

**Короткий огляд літератури.** Серед робіт, які присвячені розрахункам і аналізу електромагнітних процесів в електротехнічних пристроях з біфілярними котушками, можна виділити наукові видання [2, 3], де викладено постановки і вирішення найбільш поширених завдань прикладної електродинаміки в області сильних і надсильних електромагнітних полів. Причому, в [2] мова йде про розрахунки різноманітних котушок, що застосовуються у техніці плазмових згустків. В попередніх роботах [3] автори сконцентрували увагу у викладанні матеріалу на соленоїдах, що представляють собою інструменти безконтактної силової обробки електропровідних заготовок. Особливо слід відзначити попередні роботи різних авторів [4, 5], де представлено актуальні розробки і рекомендації по використанню енергозберігаючих технологій задля вирішення нагальних проблем сучасного автотранспорту.

Конструктивно обмотки біфіляра можуть бути виконані у вигляді масивних або тонкостінних багатовиткових котушок. В попередній роботі [6] автори проаналізували електромагнітні процеси в індукторних системах з масивними добре провідними біфілярами. Авторами розраховано основні характеристики дослідженої системи і чисельно проілюстровано можливість отримання досить високого рівня перетворення енергії індуктора в енергію обмоток біфіляра. У разі тонкостінних обмоток біфіляра, на відміну від масивних реалізацій, має місце інтенсивний вихід електромагнітної потужності в навколишній простір. Ці процеси вимагають аналізу і числових оцінок визначальних характеристик, що, в кінцевому підсумку, необхідно задля обґрунтування практичної дієздатності запропонованої індукторної системи.

---

© Батигін Ю.В., Шиндерук С.О., Чаплигін Є.О., Єрємін О.Ф., 2020  
ORCID ID: \*<https://orcid.org/0000-0002-1278-5621>; \*\*<https://orcid.org/0000-0002-6354-4174>;  
\*\*\*<https://orcid.org/0000-0003-1448-6091>; \*\*\*\*<https://orcid.org/0000-0002-8123-1104>

Для схем обладнання магнітно-імпульсної обробки металів, описаних в [3], практичний інтерес представляють дослідження плоских індукторних систем, де багатовитковий соленоїд-індуктор розміщується між гілками біфілярної котушки.

Так, автори [7] фундаментально досліджували процес високошвидкісного деформування листових металів магнітним полем стрижневої котушки.

У дослідженні [8] запропоновано магнітно-імпульсну установку як складову силового обладнання у технології плоского штампування. Її використання дає змогу деформувати листи з різних алюмінієвих сплавів, що досягається за допомогою різних інструментів-штампів (це питання автор розглядає як подальший предмет дослідження). Особливістю запропонованої установки є можливість її гнучкого налаштування за рахунок підбору параметрів електричної схеми.

Докладно магнітно-імпульсну обробку матеріалів було проаналізовано авторами [9] як імпульсну або високошвидкісну технологію формування за допомогою імпульсного магнітного поля для застосування сил Лоренца до заготовок, виготовлених, переважно, з високоелектропровідного матеріалу без механічного контакту та без робочого середовища.

**Метою роботи** є аналіз та оцінки характеристик електромагнітних процесів у запропонованій плоскій індукторній системі, що складається з тонкого соленоїда-індуктора, розміщеного між гілками біфіляра – тонкостінними багатовитковими котушками, які є «прозорими» для збуджених полів. Такі оцінки становлять інтерес під час вибору конструктивних рішень для нових елементів обладнання в магнітно-імпульсній обробці металів.

**Наукова новизна** полягає в проведенні аналізу електромагнітних процесів, які протікають, з числовими оцінками характеристик збуджених полів, який дає змогу дати обґрунтований науковий висновок щодо практичної дієздатності досліджуваної індукторної системи.

**Аналіз і числові оцінки.** У роботі [3] авторами отримано аналітичні залежності для полів і струмів в індукторній системі з двох ідентичних листових металів, між якими розміщений круговий індуктор. У запропонованій постановці даного завдання можна скористатися отриманими в [3] рішеннями, якщо задатися наступним:

- міжвиткові зазори обмотки збуджуючого індуктора досить малі, його поверхні можна вважати суцільними і густина струму, що протікає, розподілена рівномірно по радіусу так, що функція радіального розподілу має вигляд  $f(R) = \eta(r-R_1) - \eta(r-R_2)$ , де  $\eta(r-R_{1,2})$  – ступінчасті функції Хевісайда [12],  $R_{1,2}$  – внутрішній і зовнішній радіуси індуктора, відповідно,  $r$  – радіальна координата;
- індуктор досить тонкий і не впливає на електромагнітні процеси, що протікають в біфілярі. Витки соленоїда-індуктора виконані із металу кінцевої товщини –  $D$  є достатньо тонкими, «прозорими» для полів, що збуджуються, і не впливають на електромагнітні процеси, що протікають, а міжвиткові зазори настільки малі, що його робочі поверхні можна вважати суцільними;
- витки обмоток біфіляра щільно прилягають один до одного так, що утворюють суцільну металеву поверхню;
- електродинамічна товщина металу обмоток біфіляра досить мала, так, що  $\omega \cdot \tau < 1$ , де  $\omega$  – циклічна частота збуджуючого струму в індукторі,  $\tau = \mu_0 \cdot \gamma \cdot d^2$  – характерний час дифузії поля в немагнітний провідний шар товщиною  $d$  з питомою електропровідністю  $\gamma$  ( $\mu_0$  – магнітна проникність вакууму).

«Електродинамічну товщину» провідного шару як числову характеристику ступеня його «прозорості» для діючого поля можна визначити як величину, пропорційну відношенню характерного часу дифузії в провідний шар  $\tau$  до характерного часового параметру діючого поля, його періоду  $T$ . Згідно з

цим визначенням, електродинамічна товщина – це  $\tau/T \sim (\omega \cdot \tau)$ . У разі інтенсивних процесів проникнення  $(\omega \cdot \tau) < 1$ , що відповідає відношенню  $d/\Delta < 1$ , де  $\Delta$  – величина скін-шару [2, 3].

Задля ясності викладання на рис. 1 наведено фізико-математичну модель запропонованої кругової індукторної системи (радіальний переріз), де 1 – плоский багатовитковий соленоїд-індуктор; 2 – гілки біфіляра – плоскі багатовиткові соленоїди.

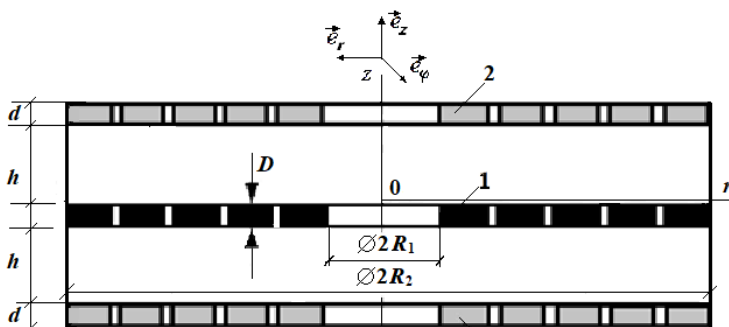


Рис. 1

З роботи авторів [3] отримаємо просторово-часову залежність для лінійної густини струму, індукованого в обмотках біфіляра. Остання в разі гармонічного процесу буде визначатися наступним виразом:

$$j_i(t, r) \approx \frac{\mu_0 \gamma}{2} \cdot (\omega \cdot \cos(\omega t)) \cdot \int_0^{\infty} f(\lambda) \cdot e^{-\lambda h} \cdot \frac{1 - e^{-\lambda d}}{\lambda} \cdot J_1(\lambda r) d\lambda, \quad (1)$$

де  $f(\lambda) = \int_{R_1}^{R_2} r \cdot J_1(\lambda r) dr$  – образ функції рівномірного радіального розподілу збуджуючого струму в індукторі,  $J_1(\lambda r)$  – функція Бесселя першого роду першого порядку,  $\lambda$  – параметр інтегрального перетворення Фур'є-Бесселя [10].

Вираз (1) перетворимо до співвідношень, що є зручними в практичних обчисленнях і встановлюють залежність відношення часових максимумів лінійної густини струму в обмотках біфіляра  $j_{im}$  і в індукторі  $j_m$  від радіусу і товщини металу обмоток.

Після необхідних тотожних перетворень отримуємо

$$\frac{j_{im}(r)}{j_m} \approx \frac{\omega \tau}{2} \cdot \int_0^{\infty} f(x) \cdot e^{-\left(x \frac{h}{d}\right)} \cdot \frac{(1 - e^{-x})}{x^3} \cdot J_1\left(x \cdot \frac{r}{d}\right) dx, \quad (2)$$

де  $f(x) = \int_{(x \cdot R_1/d)}^{(x \cdot R_2/d)} y \cdot J_1(y) dy$ ;  $x = \lambda \cdot d$  – нова змінна інтегрування.

Інтегруючи вираз (2) по радіусу  $r \in [R_1, R_2]$ , знайдемо відношення середніх радіальних величин густини індукованого і збуджуючого струму

$$\frac{\overline{j_{im}}(d)}{j_m} \approx \frac{\omega \tau}{2} \cdot \frac{d}{(R_2 - R_1)} \int_0^{\infty} f(x) e^{-\left(x \frac{h}{d}\right)} \frac{(1 - e^{-x})}{x^4} \left( J_0\left(x \frac{R_1}{d}\right) - J_0\left(x \frac{R_2}{d}\right) \right) dx, \quad (3)$$

де  $\overline{j_{im}}(d)$  – середня величина індукованого струму за фіксованої товщини  $d$ ;  $J_0\left(x \cdot \frac{R_{1,2}}{d}\right)$  – функції Бесселя першого роду нульового порядку [10].

Аналіз електромагнітних процесів проведемо на прикладі експериментальних моделей досліджуваної індукторної системи:  $R_1 = 0,015$  м,  $R_2 = 0,09$  м,  $h = 0,02$  м,  $d \in [0,0001; 0,0003]$  м, робоча частота збуджуючого струму  $f = 25000$  Гц.

Результати обчислень наведено нижче: на рис. 2, а – залежність середньої величини відносної густини індукованого струму (нормування на середню густину збуджуючого струму в індукторі) від товщини металу обмоток біфіляра, а на рис. 2, б – залежність параметра  $W(d) = \omega \tau$ , який встановлює рівень «прозорості» металу обмоток біфіляра від його товщини.

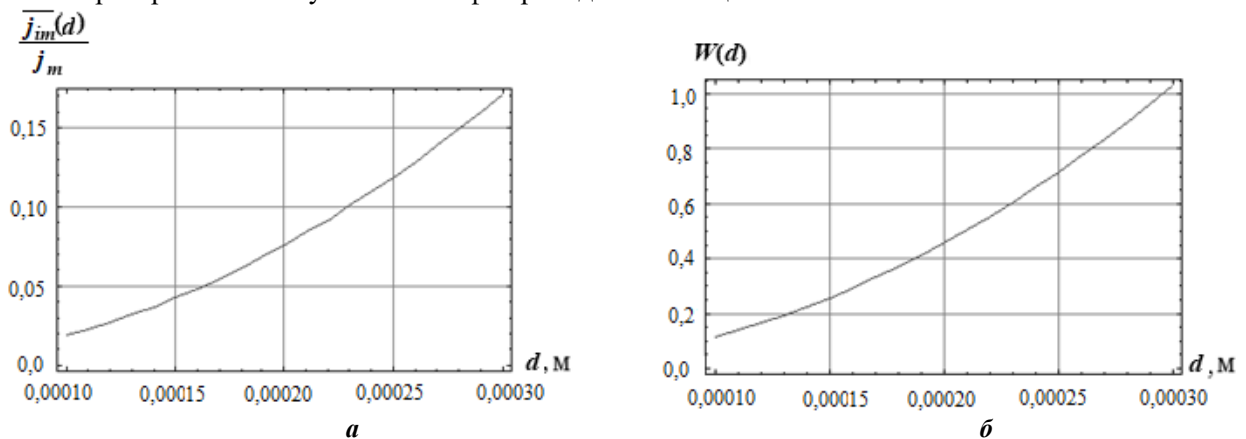


Рис. 2

Радіальний розподіл середньої величини відносної густини індукваного струму (нормування на середню густину збуджуючого струму в індукторі) показано на рис. 3.

Основні результати проведених обчислень зводяться до наступних положень.

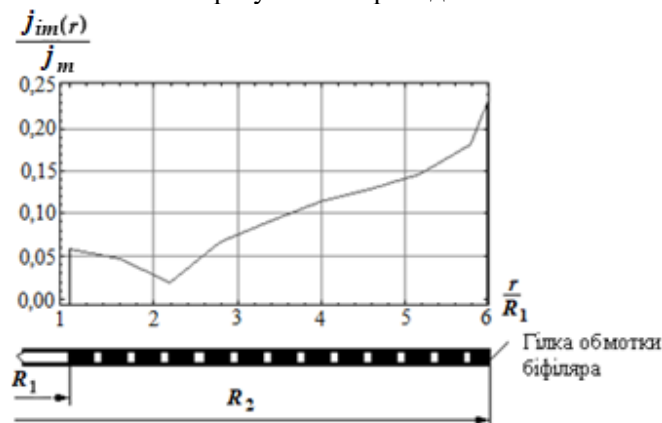


Рис. 3

3. Радіальний розподіл індукваного струму, на відміну від рівномірного розподілу струму в індукторі, має наростаючий характер від внутрішнього до зовнішнього радіусу обмотки біфіляра, що, вочевидь, вимагає посиленої ізоляції її міжвиткових зазорів.

На закінчення додамо практичне міркування, що узагальнює проведений аналіз, з якого випливає необхідність збільшення електродинамічної товщини обмоток біфіляра. Останню рекомендацію можна реалізувати або за рахунок збільшення їхньої геометричної висоти, або за рахунок застосування феромагнетиків. І перше, і друге знижують розсіювання електромагнітної енергії назовні. Відзначимо, що збільшення питомої електропровідності практично неможливо через те, що обмотка з міді має відповідний досить високий показник.

Щодо знімання індукваного сигналу по максимуму, слід враховувати і вплив паразитної міжвиткової ємності в обмотці біфіляра. Замикання частини індукваного струму по її внутрішнім паразитним контурам повинно призводити до зниження реального показника ефективності перетворення струмів від індуктора до біфіляру.

У разі збільшення геометричної висоти витків і фіксації інших розмірів пропорційно зростає паразитна ємність. Звідси випливає, що просте збільшення геометричної висоти обмотки (яке знизить розсіювання електромагнітної енергії) може супроводжуватися істотними втратами індукваного вихідного сигналу [11].

#### Висновки.

1. Проведено аналіз характеристик електромагнітних процесів у запропонованій плоскій індукторній системі, що складається з тонкого соленоїда-індуктора, який розташовано між гілками біфіляра – тонкостінними багатовитковими котушками, «прозорими» для збуджених полів.

2. Обчислено основні показники електромагнітних процесів у запропонованій системі, принципове додержання яких забезпечує створення ефективних інструментів магнітно-імпульсної обробки металів.

3. Сформульовано практичні рекомендації щодо вибору ізоляції міжвиткових проміжків обмотки біфілярів, що дасть змогу уникнути електричного пробоя у режимі високих напруг.

4. Обговорюються проблеми збільшення ефективності перетворення струмів в розглянутій індукторній системі.

*Роботу виконано у Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті за держбюджетною темою № держреєстрації 0119U001298: «Енергозберігаючі маловитратні технології створення та ремонту гібридних транспортних засобів різного призначення».*

1. Padmanabhan K., Swaminathan P. Electronic Components. New Delhi: Laxmi Publications LTD, 2006. 204 p.
2. Shneerson G.A., Dolotenko M.I., Krivosheev S.I. Strong and Superstrong Pulsed Magnetic Fields Generation. Berlin: Walter de Gruyter, 2014. 429 p.
3. Batygin Yu., Barbashova M., Sabokar O. Electromagnetic Metal Forming for Advanced Processing Technologies. Cham: Springer International Publishing AG, 2018. 94 p.
4. Батигін Ю.В., Гнатов А.В. Особливості збудження електромагнітних сил при магнітно-імпульсній обробці листових феромагнетиків. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 1. С. 71-77.
5. Hnatov A., Arhun Shch., Ponikarovska S. Energy saving technologies for urban bus transport. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*. 2017. Vol. 14. No 4. Pp. 4649-4664.
6. Батыгин Ю.В., Гаврилова Т.В., Шиндерук С.А., Чаплыгин Е.А., Саенко В.А. Плоская индукторная система с массивными катушками бифиляра. Анализ электромагнитных процессов. *Технічна інженерія*. 2019. № 2(84). С. 115-119.
7. Shim J.-Y., Kang B.Y., Park D.-H., Kim I.S. A Fundamental Study on Magnetic Pulse Forming with Bar Forming Coil. *Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*. 2011. Vol. 20. No 3. Pp. 292-297.
8. Inanan G., Baranoglu B., Aydin E. 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.
9. Psyk V., Rich D., Kinsley B.I., Tekkaya A.E., M. Kleiner Electromagnetic Forming – A Review. *Journal of Material Processing Technology*. 2011. No 211. Pp. 787-829.
10. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. М.: Наука, 1973. 831 с.
11. Яворский Б.М., Детлаф А.А., Лебедев А.К., Справочник по физике для инженеров и студентов ВУЗов. М.: ООО «Издательство Оникс», 2006. 1056 с.

УДК 621.318

#### **ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПЛОСКОЙ КРУГОВОЙ СИСТЕМЕ С ИНДУКТОРОМ МЕЖДУ ТОНКИМИ КОТУШКАМИ БИФИЛЯРА**

**Ю.В. Батыгин**, докт. техн. наук, **С.А. Шиндерук**, канд. техн. наук, **Е.А. Чаплыгин**, канд. техн. наук, **Е.Ф. Еремина**, канд. техн. наук  
**Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет,**  
 ул. Ярослава Мудрого, 25, Харьков, 61002, Украина,  
 e-mail: [s.shinderuk.2016102@ukr.net](mailto:s.shinderuk.2016102@ukr.net)

*Проведен анализ электромагнитных процессов, происходящих в индукторной системе с бифилярной катушкой, а также численные оценки характеристик возбужденных токов в условиях высокой интенсивности действующих полей. Для изучения электромагнитных процессов в тонкостенных обмотках бифиляра, в отличие от их массивных реализаций, применяется строгий математический подход с применением методов теории электромагнитного поля. Численные оценки проведены с помощью полученных аналитических зависимостей. Было показано, что амплитуда тока, индуцированного в бифилярной обмотке экспериментальной модели рассматриваемой индукторной системы, в отношении к току возбуждения не превышает 10-15%, что значительно меньше возможного максимума ~ 50%. Отмечено, что радиальное распределение индуцированного тока в бифилярной обмотке, в отличие от равномерного распределения тока возбуждения в индукторе, имеет возрастающий характер от внутреннего к внешнему радиусу бифилярной обмотки. Полученные результаты позволяют оценить уровень эффективности при выборе конструктивных решений для новых элементов оборудования в магнитно-импульсной обработке металлов. Библ. 11, рис. 3.*

**Ключевые слова:** бифилярная катушка, плоская круговая индукторная система, магнитно-импульсная обработка металлов, преобразование энергии, соленоид-индуктор.

## ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN A FLAT CIRCULAR SYSTEM WITH AN INDUCTOR BETWEEN THIN BIFILAR COILS

**Yu.V. Batygin, S.O. Shinderuk, E.O. Chaplygin, O.F. Yeryomina**  
Kharkiv National Automobile and Highway University,  
25, Yaroslava Mudruho Street, Kharkiv, 61002, Ukraine,  
e-mail: [s.shinderuk.2016102@ukr.net](mailto:s.shinderuk.2016102@ukr.net).

*The analysis of electromagnetic processes occurring in the inductor system with a bifilar coil as well the numerical estimates of the characteristics of the excited currents under conditions of high intensity of penetration of the acting fields is conducted. In order to study electromagnetic processes in thin-walled windings of a bifilar, in contrast to their massive implementations, where there is an energy intense output into the surrounding space, a strict mathematical approach with application of the theory methods of electric-magnetic field is used. The numerical estimates are conducted with help of the obtained analytical dependences. It was shown that the amplitude of the current induced in the bifilar windings of the experimental model of the considered inductor system in the ratio to the exciting current does not exceed 10-15%, which is significantly less than the possible maximum of ~ 50%. It is noted that the radial distribution of the induced current, in contrast to the uniform distribution of the exciting current in the inductor, has an increasing character from the inner to the outer radius of the bifilar winding. The obtained results allow to assess the level of efficiency when choosing design solutions for the new elements of the equipment in the magnetic-pulsed metal processing. References 11, figures 3.*

**Keywords:** bifilar coil, flat circular inductor system, magnetic-pulse treatment of metals, energy transformation, solenoid-inductor.

1. Padmanabhan K., Swaminathan P. Electronic Components. New Delhi: Laxmi Publications LTD, 2006. 204 p.
2. Shneerson G.A., Dolotenko M.I., Krivosheev S.I. Strong and Superstrong Pulsed Magnetic Fields Generation. Berlin: Walter de Gruyter, 2014. 429 p.
3. Batygin Yu., Barbashova M., Sabokar O. Electromagnetic Metal Forming for Advanced Processing Technologies. Cham: Springer International Publishing AG, 2018. 94 p.
4. Batyhin Y.V., Hnatov A.V. The features of the electrical magnetic forces excitation in the magnetic pulse sheet ferromagnetic metal working. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2012. No 1. Pp. 71-77. (Ukr)
5. Hnatov A., Arhun Shch., Ponikarovska S. Energy saving technologies for urban bus transport. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*. 2017. Vol. 14. No 4. Pp. 4649-4664.
6. Batyhin Y.V., Havrilova T.V., Shinderuk S.A., Chaplyhin Ye.A., Saenko V.A. Flat inductor system with massive bifilar coils. Analysis of electromagnetic processes. *Tekhnichna inzheneriia*. 2019. Vol. 84. No 2. Pp. 115-119. (Rus)
7. Shim J.-Y., Kang B.Y., Park D.-H., Kim I.S. A Fundamental Study on Magnetic Pulse Forming with Bar Forming Coil. *Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*. 2011. Vol. 20. No 3. Pp. 292-297.
8. Inanan G., Baranoglu B., Aydin E. 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.
9. Psyk V., Rich D., Kinsley B.I., Tekkaya A.E., Kleiner M. Electromagnetic Forming – A Review. *Journal of Material Processing Technology*. 2011. No 211. Pp. 787-829.
10. Korn H., Korn T. Mathematical Handbook. Moskva: Nauka, 1973. 831 p. (Rus)
11. Yavorskii B.M., Detlaf A.A., Lebedev A.K. Physics handbook for engineers and students of universities. Moskva: Oniks Publishing, 2006. 1056 p. (Rus)

Надійшла 17.01.20  
Остаточний варіант 06.05.2020