

ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

УДК 621.318

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2019.87.0.85

РОЗРАХУНКОВІ СПІВВІДНОШЕННЯ ПЛАСКОЇ ІНДУКТОРНОЇ СИСТЕМИ
З МАСИВНИМИ КОТУШКАМИ БІФІЛЯРАБатигін Ю. В.¹, Шиндерук С. О.¹, Гаврилова Т. В.¹, Балбекін І. А.¹
¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Вперше запропонована пласка індукторна система, де багатовитковий соленоїд-індуктор розміщено між гілками масивної біфілярної котушки, в обмотках якої індукується потужний струмовий імпульс за умов мінімального впливу його поля на електромагнітні процеси в соленоїд-індукторі. Мінімальний вплив імпульсу пояснюється тим, що струми, індуковані в обмотках біфіляра, є рівними і односпрямованими.

Ключові слова: пласка індукторна система, соленоїд-індуктор, масивна біфілярна котушка, електромагнітні процеси, струмовий імпульс.

Вступ

Котушка є біфілярною (або просто біфілярною), якщо вона намотана на одному загальному каркасі двома паралельними та ізолюваними один від одного проводами. Термін «bifilar» можна перекласти з англійської як двонитковий, двожильний або двопрвідний. Отже, «біфілярне намотування» – це намотування ізолюваним двожильним проводом.

З фізичної точки зору, ці котушки дозволяють реалізувати дві можливі ситуації. Перша передбачає створення нульового зовнішнього магнітного поля, друга – внутрішнього магнітного поля. У першому випадку струми в гілках біфіляра спрямовані протилежно. У другому випадку струми є однонаправленими.

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 контура з навантаженням на первинний контур з джерелом живлення. Біфіляр з протилежно спрямованими струмами потрібен для створення опірників у високочастотній техніці тощо.

Аналіз публікацій

Як відомо зі спеціальних наукових джерел, перші біфілярні котушки отримали свою назву за ім'ям їх винахідників. Це «котушка Айртона-Перрі» і «котушка Ніколи Тесла» [1, 2].

Вперше застосування першої з них було подано в описі патенту на транспортний за-

сіб з електричною тягою. Зараз котушка Айртона-Перрі використовується для виготовлення електронних пристроїв різного призначення [1]. Вперше пласку біфілярну котушку в електричних ланцюгах як елемент, що дозволяє отримати велику власну ємність і відмовитися від коштовних конденсаторів, [2] запропонував Нікола Тесла .

Не зупиняючись на відомих традиційних формах використання біфілярних котушок для створення дротяних резисторів з досить малою індуктивністю для генерації магнітних імпульсів будь-якої форми та для усунення небажаних резонансів у радіотехнічних пристроях тощо (досить докладно описаних, наприклад в науковому виданні [1]), слід навести останні приклади використання біфілярів. Мова йде про схеми надпровідних обмежувачів струму (FCL, SFCL) і пристроях бездротової передачі енергії (Open Bifilar Coils) [3, 4].

Детальним розробленням фізико-математичних моделей електромагнітних процесів у соленоїдах різної геометрії, що розглядаються як джерела сильних полів з технологічною метою і полів випромінювання в передавачах, присвячені роботи [5, 6].

Для схем обладнання магнітно-імпульсного оброблення металів, описаних авторами наукових видань [7, 8], практичне значення мають дослідження пласких індукторних систем, де багатовитковий соленоїд-індуктор розміщується між гілками біфілярної котушки, в обмотках якої індукується потужний струмовий імпульс за умов мінімального впливу його поля на електромагнітні процеси в соленоїд-індукторі. З фізичної

точки зору, мінімальний вплив пояснюється тим, що струми, індуковані в обмотках біфіляра, є рівними і однонаправленими. Внаслідок суперпозиції їх магнітних полів підсумкова напруженість в площині розміщення соленоїда-індуктора буде дорівнювати нулю.

Мета і постановка завдання

Метою роботи є отримання розрахункових співвідношень для аналізу і оцінки характеристик електромагнітних процесів у запропонованій пласкій індукторній системі, що складається з тонкого соленоїда-індуктора, який розміщений між гілками біфіляра – масивними багатовитковими котушками з добре провідного металу.

Наукова новизна роботи полягає в пропозиції конструктивного виконання і отриманні аналітичних залежностей для характеристик електромагнітних процесів у пласкій індукторній системі, що складається з соленоїда-індуктора і біфілярної котушки. Метою комплексу проведених досліджень є теоретичне і експериментальне обґрунтування практичної працездатності запропонованої індукторної системи.

Розрахункові співвідношення

Під час вирішення поставленого завдання маємо такі припущення:

- фізико-математична модель запропонованої індукторної системи подана на рис. 1;
- у прийнятій циліндричній системі координат об'єкт дослідження має аксіальну си-

метрію, тоді $\partial/(\partial\varphi) = 0$, φ – азимутальний кут;

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

- витки біфілярної котушки досить масивні ($d \gg R_{1,2}$) і зроблені з металу, що має високу електропровідність. Вони щільно прилягають один до одного так, що їхню поверхню з боку індуктора-соленоїда можна вважати суцільною поверхнею з ідеального провідника;

- витки соленоїда-індуктора зроблені з тонкої металевої стрічки ($D \ll R_{1,2}$, товщина – D , внутрішній і зовнішній радіуси обмотки – $R_{1,2}$), вони щільно прилягають один до одного, є “прозорими” для полів, що збуджуються ($(D/\Delta) \ll 1$, де Δ – величина скин-шару), і не впливають на електромагнітні процеси, що відбуваються [7, 8];

- у соленоїді-індукторі протікає гармонічний струм з густиною $j_\varphi(t,r,z) = j_m \cdot \sin(\omega t) \cdot f(r) \cdot \delta(z)$, де $j_m = I_m/(R_2 - R_1)$ – амплітуда густини, I_m – амплітуда струму, ω – циклічна частота, $f(r)$, $\delta(z)$ – функції радіального і поздовжнього розподілів, $\delta(z)$ – дельта-функція Дірака [9];

- тимчасові параметри струму, що збуджується, задовольняють квазістаціонарному наближенню за Ландау: $((\omega/c) \cdot l) \ll 1$ [10], де c – швидкість світла в вакуумі, l – максимальний розмір у системі.

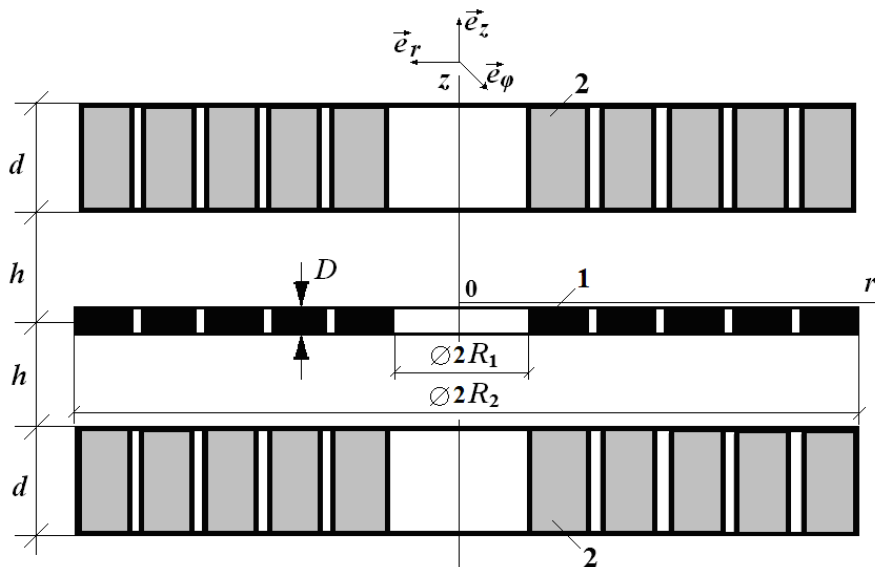


Рис. 1. Розрахункова модель індукторної системи: 1 – плаский багатовитковий соленоїд-індуктор; 2 – гілки біфіляра – пласкі багатовиткові соленоїди

Рівняння Максвелла для збуджуваних складових вектора електромагнітного поля, перетворених за Лапласом з урахуванням нульових початкових умов, мають такий вид [7, 8, 10]:

$$\begin{cases} \frac{\partial H_r(p, r, z)}{\partial z} - \frac{\partial H_z(p, r, z)}{\partial r} = j_\varphi(p, r, z); (1) \\ \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot E_\varphi(p, r, z)) = -\mu_0 p H_z(p, r, z); (2) \\ \frac{\partial E_\varphi(p, r, z)}{\partial z} = \mu_0 \cdot p \cdot H_r(p, r, z). (3) \end{cases}$$

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, отримуємо рівняння для азимутальної компоненти напруженості електричного поля в виділених областях:

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

З урахуванням кінцевості дотичної компоненти напруженості електричного поля на нескінченності розв'язок рівняння (4) можна знайти як інтеграл Фур'є-Бесселя: [9, 10]:

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

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 [9]:

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

де $K(p, \lambda) = \mu_0 \cdot p \cdot j(p) \cdot f(\lambda)$,

$$f(\lambda) = \int_{R_1}^{R_2} f(r) \cdot J_1(\lambda r) \cdot r dr.$$

Загальний розв'язок рівняння (6), що задовольняє умові симетрії відносно площини $z = 0$, має такий вигляд [9]:

$$\begin{aligned} E_\varphi(p, \lambda, z) = A(p, \lambda) \cdot \text{ch}(\lambda z) + \\ + \frac{K(p, \lambda)}{\lambda} \cdot \text{sh}(\lambda z) \cdot (\eta(z) - 0.5), \end{aligned} \quad (7)$$

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) можна знайти 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 заданим кінцевим умовам, в просторі зображень за Лапласом:

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

З рівняння (3) за допомогою виразу (9) знаходимо зображення радіальної компоненти напруженості магнітного поля в L просторі і просторі Фур'є-Бесселя:

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

Виконаємо в (10) зворотні інтегральні перетворення [9]. З урахуванням раніше прийнятих позначень знаходимо

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

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

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

Аналітичні залежності для напруженостей електромагнітного поля, що збуджується, та струмів, індукованих в біфілярі, описують процеси в запропонованій індукторній системі і повністю розв'язують задачу.

Досить перспективним щодо проведених досліджень є теоретичний аналіз електромагнітних процесів у плоских індукторних системах, де багатовиткові соленоїди розміщують між гілками масивних біфілярних котушок. Воно є необхідним для формування нових схем обладнання для магнітно-імпульсного оброблення металів.

Висновки

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

Є перспективними теоретичні дослідження та оцінка з подальшим переходом до експериментів для обґрунтування практичної дієздатності запропонованої індукторної системи.

Дослідження проведено 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 її напрямку, який розробляється кафедрою фізики ХНАДУ: «Енергозберігаючі маловитратні технології живлення та ремонту транспортних засобів», що є складовою частиною наукової тематики, що розвивається в університеті.

Література

1. Padamanabhan K., Swaminathan P. *Electronic Components*. Laxmi Publications, Paperback 2016. 204 с.
2. Мельник Э. Тесла и его подлинные взгляды. Лучшие работы разных лет. Москва: Эксмо, 2010. 320 с.
3. Min C. A., Jae Y. J., Tae K. K., Lee H., Novel Design of the Structure of a Non-Inductive Superconducting Coil. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2011. Vol. 21. Issue 3. P. 1250–1253.
4. De Miranda C. M., Pichorim S. F. A Self-resonant Two-Coil Wireless Power Transfer System Using Open Bifilar Coils. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*. 2017. Vol. 64. Issue 6, P. 615–619.
5. Подольцев А. Д., Кучерявая И. Н. Элементы теории и численного расчёта электромагнитных процессов в ферромагнитных средах. Киев: Изд. Института электродинамики НАНУ. 1999. 362 с.
6. Никищенко А. Н., Богач Н. В. Разработка модели излучения плоской катушки. Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций (РТ-2010). Севастополь. 2010. С. 362–366.
7. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий / гл. ред. Ю. В. Батыгин. Харьков: МОСТ-Торнадо, 2003. Т. 1. 284 с.
8. Batygin Yu., Barbashova M., Sabokar O., *Electromagnetic Metal Forming for Advanced Processing Technologies*. Springer International Publishing AG, Switzerland, part of Springer Nature. 2018. 94 p.
9. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров: Определения. Теоремы. Формулы / пер. И. Г. Арамановича. 6. изд. 2003. 831 с.
10. Landau L. D., Lifshitz E. M., Pitaevsky L. P. *Electrodynamics of Continuous Media*. 2-nd Edition added and enlarged. Elsevier Butterworth-Heinemann Linacre House. 2004. 620 p.

References

1. Padamanabhan K., Swaminathan P. *Electronic Components*. Laxmi Publications. Paperback. 2016.
2. Mel'nik E. Tesla i yego podlinnyye vzglyady. Luchshiye raboty raznykh. [Tesla and his authentic views. The best works of different years]. Moskva: Eksmo, 2010. 320 p.
3. Min C. A., Jae Y. J., Tae K. K., Lee H. (2011). Novel Design of the Structure of a Non-Inductive Superconducting Coil. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2011. Vol. 21. Issue 3. P. 1250–1253.
4. De Miranda C. M., Pichorim S. F. (2017). A Self-resonant Two-Coil Wireless Power Transfer System Using Open Bifilar Coils. *IEEE Transac-*

- tions on Circuits and Systems II: Express Briefs. 2017. Vol. 64. Issue 6, P. 615–619.
5. Podol'tsev A. D., Kucheryavaya I. N. Elementy teorii i chislennogo raschota elektromagnitnykh protsessov v ferromagnitnykh sredakh. [Elements of the theory and numerical calculation of electromagnetic processes in ferromagnetic media]. Kiev: Izd. Instituta elektrodinamiki NANU. 1999. 362 p.
 6. Nikishenko A. N., Bogach N. V. (2010). Razrabotka modeli izlucheniya ploskoy katushki. Sovremennyye problemy radiotekhniki i telekommunikatsiy. [Development of a flat coil radiation model Modern problems of radio engineering and telecommunications] (RT-2010). Sevastopol. 2010. Pp362–366.
 7. Impulsnyye magnitnyye polya dlya progressivnykh tekhnologiy. [Pulsed magnetic fields for advanced technologies]. Tom1. Izd.2-e, pererab. and add. under the general ed. Doctor of Technical Sciences, prof. Batygin. Yu. V. Kharkov: MOST-Tornado. 2003. T. 1. 284 p.
 8. Batygin Yu., Barbashova M., Sabokar O. Electromagnetic Metal Forming for Advanced Processing Technologies. Springer International Publishing AG, Switzerland, part of Springer Nature. 2018. 94 p.
 9. Korn G., Korn T. (2003). Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov: Opredeleniya. Teoremy. Formuly. [Mathematics Reference for Scientists and Engineers: Definitions. Theorems. Formulas]. Lan. 2003. 831 p.
 10. Landau L. D., Lifshitz E. M., Pitaevsky L. P. Electrodynamics of Continuous Media. 2-nd Edition added and enlarged. Elsevier Butterworth-Heinemann Linacre House. 2004. 620 p.

Батигін Юрій Вікторович¹, д.т.н., зав. каф. фізики, тел. +38-057-707-37-27;
e-mail: yu.v.batygin@gmail.com,

Шиндерук Світлана Олександрівна¹, к.т.н., доц. каф. фізики, тел. +38-057-707-37-27,
e-mail: s.shinderuk.2016102@ukr.net,

Гаврилова Тетяна Володимирівна¹, к.ф.-м.н., доц. каф. фізики, тел. +38-057-707-37-27,
e-mail: gavrilova.tatyana@i.ua,

Балбекін Іван Анатолійович¹, студент, тел. +38-057-707-37-27; e-mail: iabalbekin@ukr.net,

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, Харків, 61002, Україна,

The calculated ratios of flat inductor system with massive bifilary

Abstract. Problem. For the first time, a flat inductor system is proposed where a multi-turn solenoid in-

ductor is placed between the branches of a massive bifilar coil, in the windings of which a powerful current pulse is induced with a minimum effect of its field on electromagnetic processes in the solenoid inductor. Physically, the minimal influence is explained by the fact that the currents induced in the windings of the bifilar are equal and unidirectional. As a result of the superposition of their magnetic fields, the resulting tension in the plane of placement of the solenoid-inductor will be zero. **Goal.** Obtaining design relationships for analysis and evaluation of the characteristics of electromagnetic processes in the proposed flat inductor system, consisting of a thin solenoid - an inductor located between the branches of the bifilar - massive multi-turn coils of well-conducting metal. **Methodology.** For numerical estimates the analytical dependences obtained with help of the methods of electromagnetic field theory as well the standard programs from the Wolfram Mathematica package were used. **Results.** The calculated ratios for the analysis of electromagnetic processes in the proposed flat inductor system, and also theoretical studies and numerical estimates were prepared for the subsequent transition to experiments with justification of the practical capacity of the proposed inductor system. **Originality.** The scientific novelty of the research is that it first proposed an inductor system consisting of flat parallel multi-turn solenoids, one of which is a thin inductor located between the branches of a massive bifilar. Analytical dependences for excited electromagnetic fields and currents are obtained. The ultimate goal is the theoretical and experimental justification of the practical performance for the first proposed inductor system. **Practical value.** The results can be used when choosing design solutions for elements of new circuits of equipment for magnetic-pulse metal processing.

Key words: flat inductor system, solenoid-inductor, massive bifilar coil, electromagnetic processes, current pulse.

Batygin Yuriy Viktorovich¹, prof., head of the physics chair, tel. +38 087-707-37-27,
e-mail: yu.v.batygin@gmail.com,

Shinderuk Svitlana Oleksandrsvna¹, ph.d., assoc. prof., tel. +38 087-707-37-27,
e-mail: s.shinderuk.2016102@ukr.net,

Gavrilova Tatyana Vladimirovna¹, cand. sc. (physics and mathematics), assoc. prof.,
tel. +38 087-707-37-27,
e-mail: gavrilova.tatyana@i.ua,

Balbekin Ivan Anatoliyovych¹, student,
tel. +38 087-707-37-27,
e-mail: iabalbekin@ukr.net,

¹Kharkov national automobile and highway university, 25, Yaroslav Mudry street, Kharkiv, 61002, Ukraine.

Расчётные соотношения плоской индукторной системы с массивными катушками бифиляра

Аннотация. Получены расчётные соотношения для анализа и оценки характеристик электромагнитных процессов в предлагаемой плоской индукторной системе, состоящей из тонкого соленоида-индуктора, размещённого между ветвями бифиляра – массивными многовитковыми катушками из хорошо проводящего металла, подготовлены теоретические исследования и оценки для последующего перехода к экспериментам с обоснованием практической дееспособности предложенной индукторной системы.

Ключевые слова: плоская индукторная система, соленоид-индуктор, массивная бифилярная катушка, электромагнитные процессы, токовый импульс.

Батыгин Юрий Викторович¹, д.т.н., зав. каф. физики, тел. +38-057-707-37-27; e-mail: yu.v.batygin@gmail.com,

Шиндерук Светлана Александровна¹, к.т.н., доц. каф. физики, тел. +38-057-707-37-27, e-mail: s.shinderuk.2016102@ukr.net,

Гаврилова Татьяна Владимировна¹, к.ф.-м.н., доц. каф. физики, тел. +38-057-707-37-27, e-mail: gavrilova.tatyana@i.ua,

Балбекин Иван Анатольевич¹, студент, тел. +38-057-707-37-27; e-mail: iabalbekin@ukr.net.

¹Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, ул. Ярослава Мудрого, 25, г. Харьков, 61002, Украина.
