

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ОПТИМІЗАЦІЇ КОНСТРУКЦІЙ АКТИВНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЕЛЕМЕНТІВ СПЕЦТЕХНІКИ

к.т.н. І.О. Громико, к.ф.-м.н. В.В. Торяник, Б.А. Батиренко, А.В. Панченко

Запропоновано методику математичного комп'ютерного моделювання конфігурації магнітного поля струмового елемента. Виявлена теоретично і підтверджена практично аномалія форми магнітного поля ближньої зони плоскої спіральної котушки.

Вступ. Магнітне поле широко використовується в різних спеціальних технічних пристроях. До них відносяться засоби радіозв'язку, комп'ютерна техніка, засоби захисту і зняття інформації, навігаційні системи, пошукова техніка й ін. [1 – 5]. Ці технічні засоби функціонально можна розділити на випромінювачі і приймачі (реєстратори) магнітного поля. Як відомо, найпростішим випромінювачем магнітного поля є провідник зі струмом (виток). Він же (виток) використовується як найпростіший реєстратор магнітного поля. Як правило, основним (активним) робочим елементом зазначених засобів є циліндрична котушка, що працює або в активному режимі (генерація поля), або в пасивному (детектування магнітного поля), або в змішаному. Тактико-технічні характеристики даного класу спецзасобів визначаються фізичними параметрами котушок: габаритами, добротністю, індуктивністю, електричною ємністю й ін. Розрахунок і оптимізація цих параметрів є ключовим етапом створення таких пристроїв.

Однак, типова теоретична схема розрахунків струмових елементів [6 – 10, 12] обмежена застосовністю тільки до симетричних задач і не дозволяє одержати аналітичне рішення задач, що відносяться до класу несиметричних. Це обставина істотно обмежує вибір конструкції котушки і розрахунок напруженості магнітного поля в її околиці.

Метою дійсної роботи є розробка методики розрахунку напруженості магнітного поля струмового елемента, позбавлена вищевказаних обмежень. Задачами дослідження є аналіз конфігурації магнітного поля ближньої зони котушок для оптимізації їхніх конструкцій.

Розроблюємий підхід дозволяє вирішити задачу аналізу структури магнітного поля в будь-якій заданій точці простору й оптимізувати реальну конструкцію активного магнітного елемента. Запропонована мето-

дика заснована на математичному і комп'ютерному моделюванні параметрів активних струмових елементів. Практичне застосування методики може істотно прискорити й здешевіти модернізацію існуючих і розробку нових зразків спецтехніки.

При програмній реалізації запропонованої моделі увага була сконцентрована на плоскій котушці у вигляді спіралі Архімеда. У такій конструкції всі витки більш наближені до об'єкта, ніж у випадку паралельного їхнього розташування в соленоїді. Це збільшує ККД і зменшує габарити конструкції [13].

1. Теоретичні основи розрахунку магнітного поля провідника зі струмом довільної конфігурації. У загальному випадку магнітне поле провідника зі струмом довільної конфігурації (наприклад, котушки) може бути отримано відомим методом суперпозиції полів елементарних лінійних ділянок, що складають даний провідник.

Відомо, що індукцію магнітного поля \overline{B} , створювану елементарною ділянкою провідника $\Delta\overline{L}$ зі струмом I у точці заданій радіусом-вектором \mathbf{r} , можна обчислити за законом Біо-Савара-Лапласа:

$$\Delta\overline{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \left(\frac{\Delta\overline{L} \times \overline{\mathbf{r}}}{\overline{r}^3} \right). \quad (1)$$

Цей закон, що носить загальний характер, з урахуванням принципу суперпозиції полів і використовується для розрахунку магнітного поля будь-якої конфігурації провідників зі струмом [6 – 9, 12].

Для симетричних задач результат знаходять простим інтегруванням виразу (1). Так, магнітне поле в центрі кругового витка радіусом R обчислюється за простою формулою:

$$B = (\mu_0 I)/(2R). \quad (2)$$

Визначення магнітного поля струму в довільній точці простору є складною задачею, що не завжди аналітично розв'язується [9 – 11, 15].

У загальному випадку для обчислення магнітного поля в довільній точці M , заданій радіусом-вектором \mathbf{r} відносно центра струмового витка (рис. 1), необхідно визначити допоміжну функцію – векторний потенціал \overline{A} :

$$\overline{A} = \frac{\mu}{4\pi} \int \frac{\delta}{r} dV = \frac{\mu}{4\pi} \int \int_S \frac{\delta}{r} dS d\mathbf{l} = \frac{\mu}{4\pi} \int_L \frac{d\mathbf{l}}{r}, \quad (3)$$

де δ – закон розподілу лінійного струму; L – траєкторія лінійного струму, $d\mathbf{l} = \tau_0 d\mathbf{l}$ – векторний потенціал довжини лінійного струму; τ_0 – одиничний вектор, що вказує напрямку струму I ; S – поперечний переріз провідника; V – об'єм зосередження заряду; μ – магнітна проникність середовища.

Таким способом отримаємо, що

$$\bar{A} = \alpha_0 \frac{\mu I}{4\pi} \oint_L \frac{d\mathbf{l}}{R}. \quad (4)$$

Векторний потенціал має лише одну азимутальну складову α_0 , що з урахуванням симетрії системи дорівнює [7]:

$$\alpha_0 = \frac{I}{2\pi} \times \int_0^\pi \frac{a \cos \omega d\omega}{\sqrt{r^2 + a^2 - 2ar \sin \gamma \cos \omega}}. \quad (5)$$

Проекція відповідного елемента довжини $d\mathbf{l}$ на азимутальний напрямок у точці М дорівнює $\cos \alpha d\mathbf{l}$ (рис. 2).

Тому $\bar{A} = \alpha_0 \frac{\mu I}{4\pi} \oint_L \frac{\cos \alpha d\mathbf{l}}{R}.$

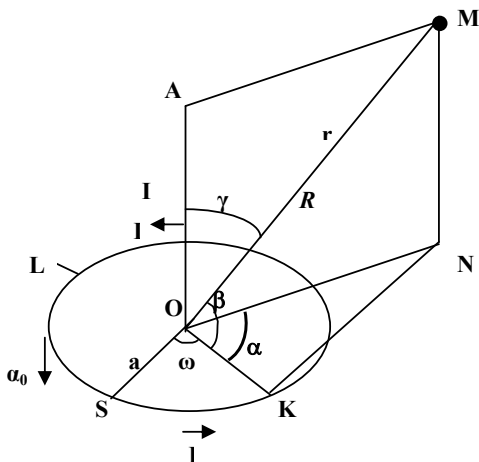


Рис. 1. До визначення магнітного поля витка в точці М

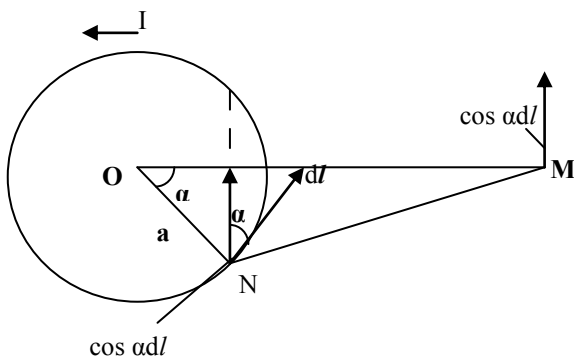


Рис. 2. Виток на площині

З огляду на те, що $d\mathbf{l} = a d\alpha$ і $R^2 = r^2 + a^2 - 2ar \cos \beta$ (рис. 1), радіус витка дорівнює $a = \sin \gamma \cos \alpha r$, звідкіля

$$\cos \beta = \frac{OK}{OM} = \frac{a}{r} = \frac{\sin \gamma \cos \alpha r}{r} = \sin \gamma \cos \alpha.$$

$$\text{Отже } \bar{A} = \alpha_0 \frac{\mu I}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{a \cos \alpha d\alpha}{\sqrt{r^2 + a^2 - 2ar \sin \gamma \cos \alpha}}.$$

Задача має рішення, якщо відстань r від центра витка до точки спостереження значно перевищує його радіус a ($r \gg a$) [6 – 11].

Розкрити знаменник підінтегрального виразу у вигляді бінома Ньютона й обмежитися його першими членами можна, якщо $a/r \ll 1 \Rightarrow (a/r)^n \approx 0$. Маємо

$$\begin{aligned} & \left(r^2 + a^2 - 2ar \sin \gamma \cos \alpha \right)^{-1/2} = \\ & = \frac{1}{r} \left[1 - \frac{1}{2} (a/r)^2 + (a/r) \sin \gamma \cos \alpha + \dots \right] \approx \frac{1}{r} (1 + (a/r) \sin \gamma \cos \alpha). \end{aligned}$$

Тоді векторний потенціал дорівнює

$$\bar{A} = \alpha_0 \frac{\mu I}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{a}{r} (1 + (a/r) \sin \gamma \cos \alpha) \cos \alpha d\alpha = \alpha_0 \frac{\mu I}{4\pi} \frac{a^2}{r^2} \sin \gamma.$$

Вектор індукції магнітного поля в сферичних координатах відповідно визначається як:

$$\bar{B} = \text{rot} \bar{A} = \frac{\mu I a^2}{4} \left[\frac{\bar{r}_0}{r^2 \sin \gamma} \frac{\partial}{\partial \gamma} \left(\frac{\sin^2 \gamma}{r} \right) - \frac{\bar{\gamma}_0}{r \sin \gamma} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\sin^2 \gamma}{r} \right) \right]; \quad (6)$$

$$\bar{B} = \frac{\mu I a^2}{4r^3} (\bar{r}_0 2 \cos \gamma + \bar{\gamma}_0 \sin \gamma) \quad (7)$$

Підкреслимо, що отримане рішення засноване на істотному обмеженні $a \ll r$, що не дозволять аналітично визначити магнітне поле, наприклад, у довільній області усередині витка.

2. Математична модель магнітного поля плоскої котушки. Було допущено, що об'єкт дослідження – магнітне поле плоскої котушки у вигляді спіралі Архімеда може бути представлено суперпозицією полів концентричних витків, діаметр яких змінюється відповідно кроку спіралі. У свою чергу, виток складається з нескінченно малих прямолінійних ділянок. При цьому магнітне поле кожного витка обчислюється як суперпозиція полів складових його дискретних ділянок (ДД), а точність результатів моделювання пропорційна кількості ДД. Чисельне рішення побудованої таким способом математичної моделі дозволяє одержати значення напруженості магнітного поля складної конфігурації провідників у будь-якій точці простору [16].

Практична реалізація розробленої моделі для плоскої котушки включає такі етапи:

1. Обчислення створеної кожною ДД магнітної індукції в будь-якій точці простору за законом Біо-Савара-Лапласа:

$$\Delta \bar{B}(r) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \left(\frac{\Delta \bar{L} \times \bar{r}}{r^3} \right),$$

де (рис. 3) $\Delta \bar{L} = (\Delta L_x; \Delta L_y; \Delta L_z)$ – координати ділянки, $\bar{r} = (r_x; r_y; r_z)$ – досліджувана точка.

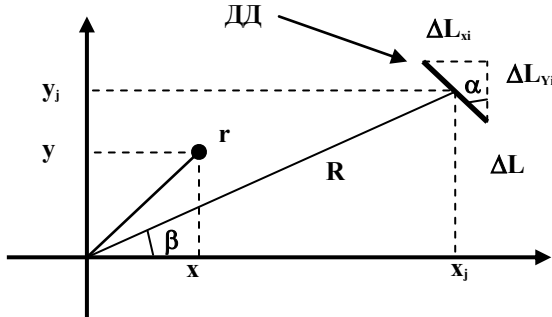


Рис. 3. Прямолинійна дискретна ділянка витка (ДД)

Якщо векторний добуток $\Delta \bar{L} \times \bar{r}$ визначити через допоміжний вектор \bar{k} ($\bar{k} = \Delta \bar{L} \times \bar{r}$), то:

$$|\bar{k}| = |\Delta \bar{L} \times \bar{r}| = \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2}; \quad \bar{k}_x = \begin{vmatrix} \Delta L_y & \Delta L_z \\ r_y & r_z \end{vmatrix} = \Delta L_y r_z - r_y \Delta L_z;$$

$$\bar{k}_y = \begin{vmatrix} \Delta L_z & \Delta L_x \\ r_z & r_x \end{vmatrix} = \Delta L_z r_x - r_z \Delta L_x; \quad \bar{k}_z = \begin{vmatrix} \Delta L_x & \Delta L_y \\ r_x & r_y \end{vmatrix} = \Delta L_x r_y - r_x \Delta L_y;$$

$$|\bar{r}| = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + r_z^2}; \quad r_x = x_j - x; \quad r_y = y_j - y; \quad r_z = z_j - z.$$

2. Визначення загального магнітного поля витка. Для визначення загального магнітного поля витка необхідний послідовний розрахунок впливу всіх ділянок з урахуванням просторового місцезнаходження і лінійних розмірів проєкцій ділянок. Для спрощення обчислення виток розміщається в одній із площин простору (площини $x - y$). Тоді проєкції ДД визначаються як:

$$\begin{aligned} \Delta L_{xi} &= \Delta L \cdot \sin \alpha; & x_i &= R \cdot \cos \beta; \\ \Delta L_{yi} &= \Delta L \cdot \cos \alpha; & y_i &= R \cdot \sin \beta; \\ \Delta L_{zi} &= 0; & z_i &= 0, \end{aligned}$$

де $i = 1 \dots N$; N – кількість ділянок витка; $\beta = 0 \dots 360^\circ$ з кроком $2\pi / N$; $\Delta L = 2\pi R / N$; R – радіус витка, а результатом цих дій є значення магнітної індукції, створеної всіма ділянками витка – B_R .

3. *Визначення загальної магнітної індукції в заданій точці здійснюється завдяки суперпозиції магнітної індукції витків, створюючих спіраль:*

$$B_{\text{повн}} = B_{R1} + B_{R2} + \dots + B_{R_{m-1}} + B_{R_m},$$

де R_m – радіус зовнішнього витка спіралі.

Алгоритм визначення магнітної індукції спіралі наведено нижче.



Рис. 4. Послідовність визначення магнітної індукції спіралі

Розроблений алгоритм може бути реалізований на ПК у будь-якому середовищі розробки прикладень. Авторами була створена прикладна програма моделювання конфігурації магнітних полів кругового витка і спіралі з використанням середовища програмування Delphi. Результати наведені на рис. 6 і 7.

3. Експериментальні дослідження. Метою експериментальних досліджень було підтвердження адекватності математичної моделі результатам комп'ютерного моделювання. У ході проведених експериментів була отримана фактична інформація про конфігурацію магнітного поля в ближній зоні як традиційних найпростіших магнітних генераторів кільцевої конструкції, так і більш складних спіральних конструкцій, що застосовуються в спецтехніці.

Для вивчення конфігурації магнітного поля була створена вимірвальна установка, принципова схема якої наведена на рис. 5. Установка дозволяє сканувати датчиком Холла магнітне поле котушки в обраній площині. При цьому можливо вимірювання як нормальної, так і тангенціальної складових магнітного поля.

Вимірювальним елементом є плоский датчик Холла ($2 \times 2 \times 0,5$ мм) з анізотропною чутливістю порядку величини магнітного поля Землі ($H \sim 30$ А/м).

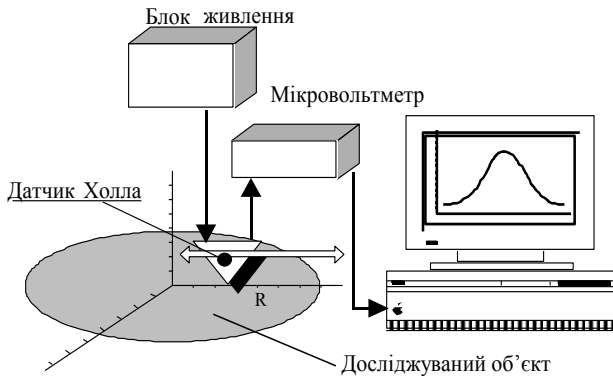


Рис. 5. Схема установки для вивчення конфігурації магнітного поля

Експеримент складався з трьох етапів:

1. Тарування установки в магнітному полі лінійного струму. При цьому контролювалася відповідність результатів вимірювання вектора напруженості магнітного поля (за величиною й орієнтацією) розрахунковим значенням, що для лінійного струму відомі.

2. Одержання залежності нормальної компоненти магнітного поля від координати $H(R)$ для кругового витка зі струмом радіусом 85 мм (рис. 6).

3. Сканування поверхні спіралі Архімеда для вимірювання залежності нормальної компоненти магнітного поля від координати $H(R)$ (рис. 7). Параметри спіралі: мідний провід діаметром 0,4 мм, крок спіралі – 0,45 мм, зовнішній радіус – 235 мм.

4. Обговорення результатів експерименту. Експериментальні результати, представлені в графічному вигляді на рис. 6, 7, дозволяють якісно зіставити теоретичні й емпіричні конфігурації магнітних полів витка і спіралі, тобто оцінити адекватність розробленої моделі.

4.1. Магнітне поле витка. На рис. 6 наведені експериментальна (точки) і розрахункова (лінія) залежності нормальної компоненти магнітного поля кругового витка зі струмом. Тут нульова координата осі абсцис – центр витка, точка перетинання графіка з віссю – його радіус. Спостерігається збільшення значення вектора магнітної індукції в міру наближення до провідника з центра витка. При виході за границі витка магнітне поле змінює напрям і в міру віддалення від провідника слабшає. Відзначимо, що залежність несиметрична щодо радіуса витка, оскільки усередині вит-

ка магнітне поле однорідне за напрямком, тоді як поза витком виникає "протидія" магнітних полів від різних дискретних ділянок.

Як видно з рис. 6, отримані залежності принципово ідентичні. Незначні відхилення пікових значень, що спостерігаються, обумовлені кінцевими розмірами датчика Холла, внаслідок чого емпірична залежність виглядає більш гладкою.

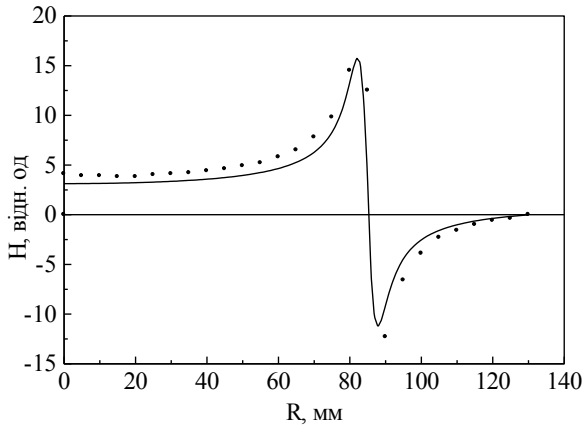


Рис. 6. Експериментальна (точки) і теоретична (лінія) конфігурації магнітного поля кругового витка зі струмом

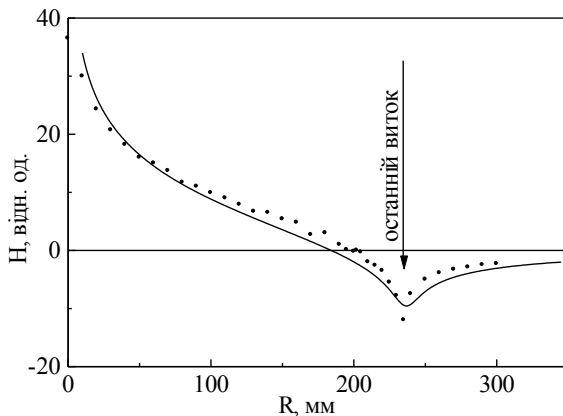


Рис. 7. Експериментальна (точки) і теоретична (лінія) конфігурації магнітного поля спіралі

Дані результати доводять вірність використовуваного алгоритму і можливість його застосування для аналізу інших конфігурацій струмів, складовим елементом яких виступає виток.

4.2. Магнітне поле спіралі. Тепер представимо порівняльну характеристику для спіралі. На рис. 7 наведені експериментальна (точки) і теоретична (лінія) конфігурації (нормальної компоненти) магнітного поля для спіралеподібного струму. Відповідно нульова координата – центр витка, точка мінімуму – зовнішній радіус спіралі, інтервали зростання й спадання графіка $H(R)$ – області силових ліній усередині і за межами зовнішнього радіуса спіралі. Області позитивних і негативних значень магнітного поля умовно відповідають протилежним напрямкам вектора його напруженості.

Конфігурація магнітного поля в ближній зоні спіралі не настільки тривіальна в порівнянні з формою магнітного поля витка, де результат цілком відповідає очікуваному. Так на поверхні спіралі існує ділянка з нульовою напруженістю, відносна координата якої дорівнює $0,87R$. Це значення є деякою постійною, справедливою для різних радіусів спіралі [13].

Відповідно до принципу суперпозиції полів цей несподіваний результат є цілком зрозумілим, але на наш погляд не є очевидним.

Висновки. При конструюванні спецтехніки важливо представляти форму магнітного поля в ближній зоні активних електромагнітних елементів, особливо при їхній нетрадиційній конструкції. Однією з таких конструкцій є плоска спіральна котушка, що має низку технологічних переваг.

Новизна запропонованого дослідження полягає в розробці та застосуванні математичної моделі для вивчення аномалії форми магнітного поля ближньої зони плоскої котушки.

У ході математичного моделювання плоска котушка розглядається як система концентричних струмових витків, що умовно утворюють спіраль. Оскільки аналітичне визначення напруженості магнітного поля поблизу такої системи утруднено, був застосований принцип суперпозиції для чисельного рішення задачі.

При аналізі кількісних характеристик відкритий невідомий ефект, а саме, виявлено, що на поверхні спіралі магнітне поле змінює напрямок. При цьому існує "нульовий" виток з координатою $0,87$ радіуса спіралі, поблизу якого магнітне поле відсутнє (скомпенсоване). Коректність результатів моделювання експериментально підтверджена.

Практична значимість роботи полягає в тому, що виявлені аномалії варто враховувати в спіральних конструкціях випромінювачів і реєстраторів магнітного поля, причому розроблена математична модель універсальна і застосовна для розрахунку магнітних полів довільних струмових конфігурацій.

ЛІТЕРАТУРА

1. Болдырев А.И., Сталенков С.Е. Надежное стирание информации – миф и реальность // Конфидент. – 2001. – № 1(37). – С. 38 – 43.
2. Вим Ван Эйк. Электромагнитное излучение видеодисплейных модулей: Риск перехвата информации // Конфидент. – 2001. – № 1(37). – С. 90 – 93.
3. Вим Ван Эйк. Электромагнитное излучение видеодисплейных модулей: Риск перехвата информации // Конфидент. – 2001. – № 2(38). – С. 84 – 93.
4. Горячев С.В. Об исследовании закономерного убывания электромагнитного поля в реальных условиях эксплуатации // Специальная техника. – 2002. – № 1. – С. 49 – 60.
5. Беседин Д.И., Боборыкин С.Н., Рыжиков С.С. Предотвращение утечки информации, хранящейся в накопителях на жестких магнитных дисках // Специальная техника. – 2001. – № 1. – С. 41 – 47.
6. Никольский В.В. Теория электромагнитного поля. – М.: Высшая школа, 1964. – 364 с.
7. Кнопфель Г.С. Сверхсильные эмпирические магнитные поля. – М.: Мир, 1972. – 391 с.
8. Берклевский К.Е. Электричество и магнетизм. Т. 2. – М.: Наука, 1975. – 440 с.
9. Тозони О.В., Маергойз И.Д. Расчет трехмерных электромагнитных полей. – К.: Техника, 1974. – 352 с.
10. Бинс К. Анализ расчета электрических и магнитных полей. – М.: Энергия, 1970. – 375 с.
11. Демирчян К.С. Моделирование магнитных полей. – Л.: Энергия, 1974. – 285 с.
12. Бэрк Г.Ю. Справочник по магнитным явлениям. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 384 с.
13. Юрцев О.А. Спиральные антенны. – М.: Сов. радио, 1974. – 223 с.
14. Вонсовский С.В. Магнетизм. – М.: Наука, 1984. – 1032 с.
15. Бухгольц Г.В. Расчет электрических и магнитных полей. – М.: Иностранная литература, 1961. – 712 с.
16. Гулд Х., Тобочник Я. Компьютерное моделирование в физике. Ч. 1. – М.: Мир, 1994. – 352 с.
17. Gromyko I.A., Toryanik V.V. Abstract “Magnetic field of spiral coil’s near-field zone” // EURESCO Conferences 2003, AFID 28488, AFID 28494.

Надійшла 5.04.2004

ГРОМИКО Ігор Олексійович, канд. техн. наук, доцент кафедри захисту інформації та спеціальної техніки Національного університету внутрішніх справ. Область наукових інтересів – захист інформації та спеціальної техніки.

ТОРЯНИК Володимир Володимирович, канд. фіз.-мат. наук, доцент кафедри захисту інформації та спеціальної техніки Національного університету внутрішніх справ. Область наукових інтересів – інформаційні системи та спеціальна техніка.

БАТИРЕНКО Богдан Анатолійович, курсант факультету управління та інформатики Національного університету внутрішніх справ.

ПАНЧЕНКО Артем Володимирович, курсант факультету управління та інформатики Національного університету внутрішніх справ.