

МАГНІТОМЕТРИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПРИСТРОЇВ КЕРУВАННЯ РУХОМИМИ ОБ'ЄКТАМИ

М.Ф. Смирний*, докт.техн.наук, **А.П. Полив'янчук****, докт.техн.наук
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова,
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002, Україна.
E-mail: mfsmirny@gmail.com

На підставі вирішення двовимірної потенціальної задачі, яка описується диференціальними рівняннями еліптичного типу, отримано аналітичні вирази ортогональних складових напруженості зовнішнього магнітного поля з боку полюсу стрижневого постійного магніту. Ці вирази використано як інформативні параметри при побудові магнітометричних перетворювачів на базі стрижневого постійного магніту та цифрових датчиків Холла. Наведено структурну схему та діаграму роботи запропонованого інформаційного пристрою керування рухомим об'єктом з визначенням напрямку переміщення одного об'єкта відносно іншого та зменшення їхньої взаємної швидкості в околі місця точної зупинки. Бібл. 12, рис. 6.

Ключові слова: магнітометричний перетворювач, постійний магніт, напруженість магнітного поля, цифровий датчик Холла, рухомий об'єкт, точна зупинка.

Вступ і постановка проблеми. Магнітометричні перетворювачі знаходять широке застосування в системах керування рухомими об'єктами такими, як електричні транспортні засоби з переривчастим характером руху, а саме: ліфти, крани, крани-штабелери, конвеєри, порталні роботи, коксоштовхачі коксових батарей, а також для позиціонування кареток та супортів верстатів, фіксації роботи люків, засувок котельного устаткування, в універсальних автоматизованих вимірювальних комплексах з мікротунелями для екологічного діагностування двигунів тощо.

Магнітометричні перетворювачі являють собою магнітну систему «джерело магнітного поля-магніточутливий елемент». Як джерела магнітного поля використовують стандартні магнітні сигнали, мітки на неспеціальних магнітоносіях таких, як сталеві конструкції (залізничні рейки, феромагнітні направляючі, сталеві канати, плоскі феромагнітні деталі), постійні магніти довільної конфігурації, котушки зі струмами. Магніточутливими елементами слугують індукційні та потокочутливі магнітні головки, датчики Холла, ферозонди, магніторезистори, магнітотранзистори, магніотиристри.

Основні методи розрахунку полів джерел магнітного поля поділяються на три групи [1]: аналітичні, графічні, чисельні. Сьогодні на практиці використовується велика кількість ефективних комп'ютерних методів розрахунку полів складних магнітних систем. Висока ефективність скінченно-елементних моделей обумовила появу потужних професійних програм ANSYS, ELCUT, COMSOL, що реалізують метод скінченних елементів. Так, робота [2] присвячена розрахунку магнітного поля на основі програмного пакету ANSYS. У [3] виведені основні формули методу скінченних елементів тривимірних статичних потенціальних магнітних полів в областях, заповнених нелінійними безгистерезисними анізотропними середовищами.

Постійний магніт представляє собою джерело магнітного поля з розподіленими параметрами. У загальному випадку довільної форми постійних магнітів аналітичні дослідження конфігурації їхнього зовнішнього поля є складними, і більш-менш точний розрахунок можливий лише чисельними методами. Проте для розрахунку полів постійних магнітів достатньо простої форми, наприклад, паралелепіпед, циліндр, кільце, існують різноманітні аналітичні дослідження. Так, у [4] наведено аналітичний розрахунок поля осевого кільцевого постійного магніта, щодо якого з використанням кулонівського підходу визначено радіальні та осеві складові напруженості поля. У [5] представлено аналітичні вирази магнітної індукції поля циліндричних постійних магнітів. На підставі досліджень, викладених у [6, 7], постійний магніт представлено імітаційною моделлю у вигляді поверхневих магнітних «зарядів», рівномірно розподілених на полюсних гранях магніта з поверхневою щільністю J_T . При цьому визначена z -складова напруженості магнітного поля моделі магніта в просторовій

тривимірній магнітній системі. У роботі [8] застосовано метод еквівалентного соленоїда при розрахунку параметрів постійного магніта з осевою симетрією.

Зазначений перелік методів аналізу магнітних полів підкреслює потребу використання поряд з потужними чисельними методами також аналітичних методів розрахунку, перш за все, саме ортогональних складових напруженості зовнішнього поля постійних магнітів, зокрема, виготовлених у формі стрижнів.

Метою роботи є отримання достатньо точних і простих аналітичних виразів розподілу ортогональних складових напруженості зовнішнього поля стрижневого прямокутного постійного магніта як складника магнітометричного перетворювача, які можуть бути оброблені мікропроцесорним пристроєм, і побудова на цій основі інформаційних пристроїв керування об'єктами з переривчастим характером руху.

Математична модель. За умови введення низки припущень, основним з яких є конструктивна ідеалізація тіла постійного магніта, можливий розгляд двовимірної потенціальної задачі, яка описується диференційними рівняннями еліптичного типу.

З метою визначення області просторової зміни поля розглянуто ідеалізовану двовимірну модель стрижневого прямокутного постійного магніта у присутності з боку його полюсу датчика Холла. При дослідженні зовнішнього поля магніта використано метод аналізу статичних полів, наведений у [9], суть якого полягає в представленні тіла магніта у вигляді залишкової намагніченості та розкладанні її в ряд Фур'є. Після рішення граничної задачі для однієї з довільної гармонійної складової просторового спектру в області розташування магніта визначають магнітний потенціал, обумовлений всіма гармоніками спектру, а потім знаходять ортогональні складові напруженості зовнішнього поля магніта.

Аналіз поля проведено для прямокутного стрижня висотою h та товщиною 2Δ . З достатньо високою для практики точністю можна вважати відносну магнітну проникність μ_h магніта постійною величиною, його тіло – ізотропним середовищем, а датчик Холла – точковим.

Двовимірну ідеалізовану модель стрижневого постійного магніта наведено на рис. 1, де 1 – повітряний простір, 2 – область розташування магніта, 3 – область розміщення точкового датчика Холла.

Нехай залишкова намагніченість стрижневого постійного магніта дорівнює

$$\bar{M}_0(x) = \bar{j}M_{0m}P_\Delta(x), \quad (1)$$

де M_{0m} – амплітудне значення залишкової намагніченості;

$$P_\Delta(x) = 1 \text{ при } |x| \leq \Delta$$

$$P_\Delta(x) = 0 \text{ при } |x| > \Delta, \quad (2)$$

а \bar{j} – одиничний вектор, співпадаючий за напрямком з віссю y .

Для прийнятої моделі знайдемо просторовий спектр намагніченості.

Розкладання $\bar{M}_0(x)$ в інтеграл Фур'є запишеться у вигляді

$$\bar{M}_0(x) = \bar{j}M_{0m} \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{\sin \Delta \omega}{\omega} \cos x \omega d\omega. \quad (3)$$

Для довільної гармонійної складової $\omega = \Omega \neq 0$ просторового спектру

$$\bar{M}_{0\Omega} = \bar{j}M_{m\Omega} \cos \Omega x, \quad (4)$$

де $M_{0\Omega} = \frac{2}{\pi} M_{0m} \frac{\sin \Delta \omega}{\omega}$ – амплітуда намагніченості гармоніки частоти Ω , вирішується гранична

задача.

Модель гармонійної складової просторового спектру довільної частоти намагніченості вздовж осі x наведено на рис. 2.

Рівняння відносно скалярного потенціалу магнітного поля має вид

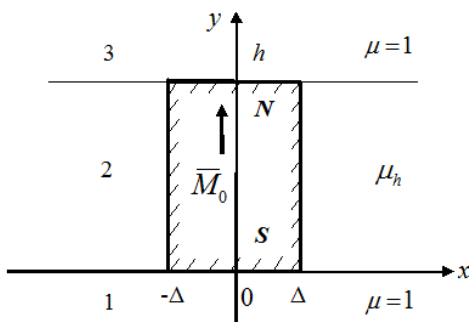


Рис. 1

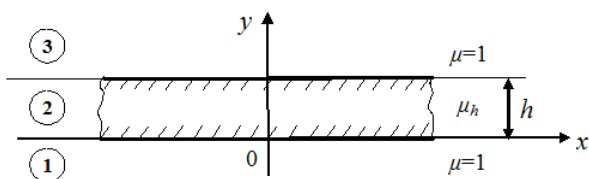


Рис. 2

$$\Delta \varphi_i = \frac{\operatorname{div} \bar{M}_{0\Omega}}{\mu_h} = -\frac{\Omega M_{m\Omega} \sin \Omega x}{\mu_h} \quad \text{при } i = 2,$$

$$\Delta \varphi_i = 0 \quad \text{при } i = 1, 3. \quad (5)$$

Рішення диференційного рівняння (5) записується у вигляді

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= A_1 e^{\Omega y} \cos \Omega x, \\ \varphi_2 &= (A_2 e^{\Omega y} + B_2 e^{-\Omega y}) \cos \Omega x, \\ \varphi_3 &= A_3 e^{-\Omega y} \cos \Omega x. \end{aligned} \quad (6)$$

Воно має задовольняти граничним умовам

$$\varphi_n = \varphi_{n+1}; \quad \mu_n \frac{\partial \varphi_n}{\partial y} = \mu_{n+1} \frac{\partial \varphi_{n+1}}{\partial y}. \quad (7)$$

Вирази для постійних інтегрування знаходяться після підстановки (7) у (6).

Постійна інтегрування для області 3, де розташовується точковий датчик Холла та яка нас цікавить, дорівнює

$$A_3 = \frac{M_{0\Omega}}{\Omega} \frac{1}{(\mu_h + 1)[1 - m e^{-2h\Omega}]} \left(1 - \frac{\mu_h}{\mu_h + 1} e^{-h\Omega} + \sqrt{m} e^{-2h\Omega} \right), \quad (8)$$

де $m = (\mu_h - 1/\mu_h + 1)^2$.

Вираз (8) можна перетворити, скориставшись алгебраїчним співвідношенням

$$\frac{1}{1-z} = \sum_{\alpha=0}^{\infty} z^\alpha \quad \text{при } z^2 < 1.$$

Тоді

$$A_3 = \frac{M_{0\Omega}}{\Omega} \frac{1}{(\mu_h + 1)} \left(1 - \frac{2\mu_h}{2\mu_h + 1} e^{-h\Omega} + \sqrt{m} e^{-2h\Omega} \right) \sum_{\alpha=0}^{\infty} \sqrt{m} e^{2\alpha} e^{-2h\alpha\Omega}. \quad (9)$$

Після підстановки (9) у (6) знайдемо скалярний потенціал магнітного поля в області 3, який відповідає гармоніці частоти $\Omega = \omega$. Потенціал, обумовлений усіма складовими спектра вихідної намагніченості, визначається виразом

$$\begin{aligned} \varphi_3 = \frac{2}{\pi} \frac{M_{0m}}{\mu_h + 1} & \left[\int_0^\infty \frac{\sin \Delta \omega}{\omega} \sum_{\alpha=0}^{\infty} m^\alpha e^{-(y+2h\alpha)\omega} \frac{\cos x\omega}{\omega} d\omega - \frac{2\mu_h}{\mu_h + 1} \int_0^\infty \frac{\sin \Delta \omega}{\omega} \sum_{\alpha=0}^{\infty} m^\alpha e^{-(y+2h\alpha+h)\omega} \frac{\cos x\omega}{\omega} d\omega + \right. \\ & \left. + \sqrt{m} \int_0^\infty \frac{\sin \Delta \omega}{\omega} \sum_{\alpha=1}^{\infty} m^\alpha e^{-(y+2h\alpha+2h)\omega} \frac{\cos x\omega}{\omega} d\omega \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

Зводячи інтеграли до табличних та враховуючи співвідношення $\bar{H} = -\operatorname{grad}\varphi$, отримуємо вирази горизонтальної H_{x3} та вертикальної H_{y3} складових напруженості поля з боку полюсу магніта

$$\begin{aligned} H_{x3} = \frac{1}{2\pi} \frac{M_{0m}}{\mu_h + 1} & \left[\sum_{\alpha=0}^{\infty} m^\alpha \ln \frac{(y+2h\alpha)^2 + (x+\Delta)^2}{(y+2h\alpha)^2 + (x-\Delta)^2} - \frac{2\mu_h}{\mu_h + 1} \sum_{\alpha=0}^{\infty} m^\alpha \ln \frac{(y+2h\alpha+h)^2 + (x+\Delta)^2}{(y+2h\alpha+h)^2 + (x-\Delta)^2} + \right. \\ & \left. + \sqrt{m} \sum_{\alpha=0}^{\infty} m^\alpha \ln \frac{(y+2h\alpha+2h)^2 + (x+\Delta)^2}{(y+2h\alpha+2h)^2 + (x-\Delta)^2} \right] \quad \text{для } x \geq 0; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} H_{y3} = \frac{1}{\pi} \frac{M_{0m}}{\mu_h + 1} & \left[\sum_{\alpha=0}^{\infty} m^\alpha \left(\operatorname{arctg} \frac{x+\Delta}{y+2h\alpha} - \operatorname{arctg} \frac{x-\Delta}{y+2h\alpha} \right) - \frac{2\mu_h}{\mu_h + 1} \sum_{\alpha=0}^{\infty} m^\alpha \left(\operatorname{arctg} \frac{x+\Delta}{y+2h\alpha+h} - \right. \right. \\ & \left. \left. - \operatorname{arctg} \frac{x-\Delta}{y+2h\alpha+h} \right) + \sqrt{m} \sum_{\alpha=0}^{\infty} m^\alpha \left(\operatorname{arctg} \frac{x+\Delta}{y+2h\alpha+2h} - \operatorname{arctg} \frac{x-\Delta}{y+2h\alpha+2h} \right) \right]. \end{aligned} \quad (12)$$

Величини H_{x3} розраховано згідно з (11) за наступними параметрами $\mu_h = 1000$; $\mu = 1$; $h = 4\Delta$; $M_{0m} = 10^4$ А/м. Криві H_{x3} при різних відстанях від поверхні полюсу магніта зображено на рис. 3.

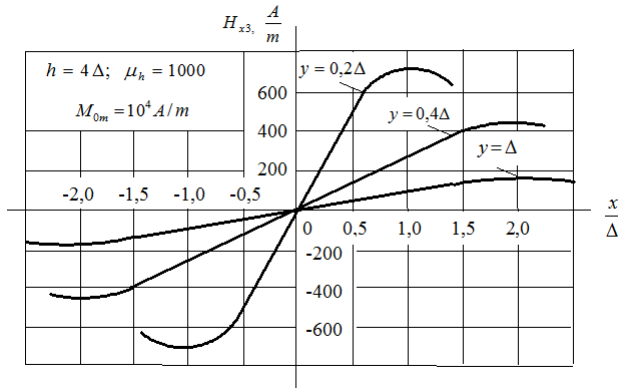


Рис. 3

лінійної ділянки кривої $H_{x\Delta}$ полягає у наступному: при фіксованому початковому значенні y_0 на кожному кроці зміни x розраховується поточний коефіцієнт нелінійності ε та порівнюється із заданим ε_a .

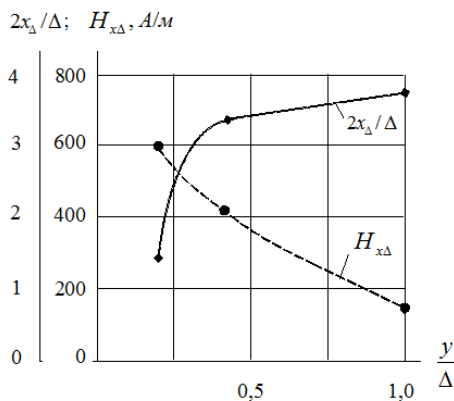


Рис. 4

Якщо $\varepsilon < \varepsilon_a$, то координата x отримує приріст Δx , і знову здійснюється порівняння ε та ε_a . У разі, коли $\varepsilon \geq \varepsilon_a$, запам'ятовуються та виводяться значення локального максимуму довжини лінійної ділянки $2x_\Delta$ та величина горизонтальної складової напруженості магнітного поля на межі інтервалу лінійності $H_{x\Delta}$. Потім координата y отримує приріст Δy та процедура розрахунку $2x_\Delta$ повторюється. За отриманими у результаті розрахунку даними для прийнятого значення $\varepsilon_a=0,01$ на рис. 4 зображено залежність приведенної довжини лінійної ділянки $2x_\Delta/\Delta$ та величини горизонтальної складової напруженості магнітного поля на межі діапазону лінійності $H_{x\Delta}$ від відстані y/Δ до поверхні полюсу постійного магніта.

Інформаційний пристрій. Відомі реалізовані пристрої керування рухомими об'єктами та знаходження цен-

тра магнітної мітки. Зокрема, раніше одним із авторів як джерело магнітного поля було використано магнітну мітку, нанесену на направляючу сталеву конструкцію, наприклад, залізничну рейку, голівкою для вертикального запису, а як ферочутливі елементи – потокочутливі магнітні голівки або ферозонди [10-12].

У цій роботі пропонується принцип дії та конструкція пристрою керування рухом та точною зупинкою рухомого об'єкта, в якому, на відміну від відомих, застосовано магнітометричний перетворювач, реалізований на основі стрижневого прямокутного постійного магніта та трьох уніполярних цифрових датчиків Холла.

Це нове технічне рішення (рис. 5), що містить перший 1, другий 2 та третій 3 уніполярні цифрові датчики Холла, другий та третій з яких розташовані один навпроти іншого, а перший – перпендикулярно відносно них. Пристрій також містить елементи НЕ – 4–8, елементи І – 9–14,

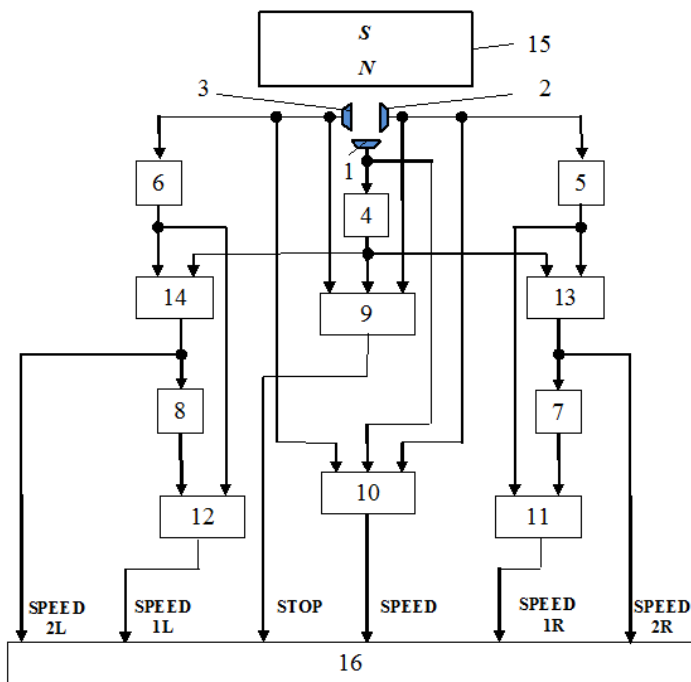


Рис. 5

стрижневий прямокутний постійний магніт 15 та мікропроцесорний пристрій 16.

На одному з елементів рухомого об'єкта в означеному місці точного позиціонування рухомого об'єкта розташовують стрижневий постійний магніт 15, а на іншому – уніполярні цифрові датчики Холла 1-3.

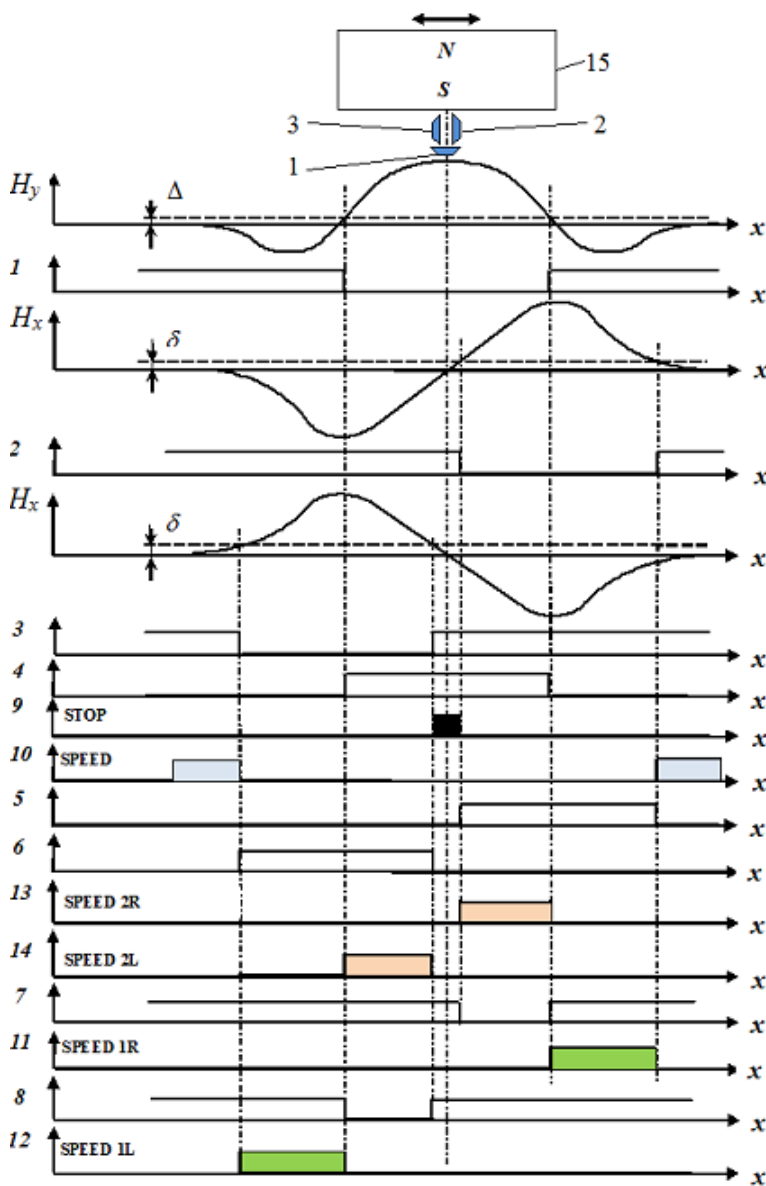


Рис. 6

швидкості на знижену. При подальшому русі об'єкта «Ліворуч» спрацьовує елемент І 14, що призводить до вироблення сигналу SPEED 2L (епюра 14), та переводить рух об'єкта на «повзучу» швидкість і забезпечує його плавну зупинку.

Належним вибором зазорів між поверхнею полюсу стрижневого постійного магніта та уніполярними цифровими датчиками Холла, а також відповідним взаємним розташуванням останніх означені інформаційні пристрої забезпечать підвищену точність, швидкодію та надійність керування рухомими об'єктами, а також формування вузької зони точної зупинки у межах від часток до одиниць мм.

Висновки.

1. Отримані аналітичні вирази горизонтальної та вертикальної складових напруженості зовнішнього поля постійного стрижневого прямокутного магніта з боку його полюсів, що ґрунтуються на лінійній моделі, зручно й доцільно застосувати при програмуванні. Вони забезпечують визначення на практиці конфігурації відповідних кривих з точністю 5...8% та величини

На рис. 6 наведено діаграми роботи пристрою.

Пристрій зупинки рухомого об'єкта працює наступним чином. Під час переміщення рухомого об'єкта перший датчик Холла реагує на вертикальну складову H_y поля магніта, другий та третій – на горизонтальну складову напруженості H_x поля магніта.

Перший датчик Холла спрацьовує, коли сигнал H_y перевищує поріг Δ (епюра 1), другий та третій – коли $H_x > \delta$ (епюри 2, 3).

Під час руху об'єкта з робочою швидкістю на виході елемента І 10 виробляється сигнал 10 (епюра 10), у напрямку «Праворуч» в момент спрацювання елемента І 11 – сигнал SPEED 1R (епюра 11), що переводить рух рухомої одиниці з робочої швидкості на знижену. При подальшому русі об'єкта «Праворуч» спрацьовує елемент І 13, що призводить до вироблення сигналу SPEED 2R (епюра 13) і переводить рух керованої одиниці на «повзучу» швидкість та забезпечує її плавну зупинку.

У момент збігу центру першого цифрового датчика Холла з центром стрижневого постійного магніта на виході елемента І 9 виробляється сигнал точної зупинки STOP (епюра 9).

У разі руху керованого об'єкта у напрямку «Ліворуч» в момент спрацювання елемента І 12 виробляється сигнал SPEED 1L (епюра 12), що переводить рух об'єкта з робочої

діапазону лінійності ділянки горизонтальної складової напруженості зовнішнього поля постійного стрижневого прямокутного магніта у широкому діапазоні (від одиниць до десятків мм).

2. Запропонована структура інформаційного пристрою демонструє новий підхід до розробки аналогічних пристроїв керування та точної зупинки рухомих об'єктів на базі магнітометричних перетворювачів, побудованих на основі стрижневих постійних магнітів та цифрових датчиків Холла. Ідея полягає в тому, що зчитування ортогональних складових напруженості поля постійного магніта цифровими датчиками Холла, кількість і розташування яких у поєднанні з відповідною електронною схемою та мікропроцесорною обробкою інформації визначають необхідні функціональні можливості пристроїв.

3. Результати роботи можуть бути використані при створенні нових і вдосконаленні існуючих пристроїв керування рухомими об'єктами з переривчастим характером руху.

1. Бинс К., Лауренсон П. Анализ и расчет электрических и магнитных полей. М.: Энергия, 1970. 376 с.
2. Babic S. Improvement in the analytical calculation of the magnetic field produced by permanent magnet rings. *Progress in Electromagnetics Research C*. 2008. Vol. 5. Pp. 71-82.
3. Ravaut R., Lemarquand G., Babic S., Lemarquand V., Akyel C. Cylindrical magnets and coils: fields, forces, and inductances. *IEEE transactions on magnetic*. 2010. Vol. 46. No 9. Pp. 3585-3590.
4. Запорожец Ю.М. Качественный анализ характеристик прямых постоянных магнитов в магнитных системах с зазором. *Техническая электродинамика*. 1980. № 3. С. 19-24.
5. Запорожець Ю.М., Кондратенко Ю.П., Шишкін О.С. Тривимірна модель для розрахунку магнітної індукції в магніточутливій системі датчика проковзування. *Технічна электродинаміка*. 2008. № 5. С. 76-79.
6. Черкасова О.А. Исследование магнитного поля постоянного магнита с помощью компьютерного моделирования. *Гетеромагнитная микроэлектроника*. 2014. № 17. С. 112-120.
7. Буль О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. Программа ANSYS. М.: Академия, 2006. 288 с.
8. Карашецкий В.П. Розрахунок тривимірних потенціальних магнітних полів методом кінцевих елементів. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2013. Вип. 23.12. С. 379-381.
9. Чацкис Л.Г. Исследование статических полей. *Электричество*. 1973. № 2. С. 47-50.
10. Смирний М.Ф. Пристрій для керування рухомими об'єктами. Патент України № 68793, 2012.
11. Смирний М.Ф. Пристрій для знаходження центра магнітної мітки. Патент України № 76193, 2012.
12. Смирний М.Ф. Пристрій для керування рухомими об'єктами. Патент України № 78227, 2013.

УДК 621.3.075

МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ИНФОРМАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖУЩИМИСЯ ОБЪЕКТАМИ

М.Ф. Смирный, докт.техн.наук, **А.П. Поливянчук**, докт.техн.наук
Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А.М. Бекетова,
ул. Маршала Бажанова, 17, Харьков, 61002, Украина.
E-mail: mfsmirny@gmail.com

На основании решения двумерной потенциальной задачи, которая описывается дифференциальными уравнениями эллиптического типа, получены аналитические выражения ортогональных составляющих напряженности внешнего магнитного поля со стороны полюса стержневого постоянного магнита. Эти выражения использованы в качестве информативных параметров при построении магнитометрических преобразователей на основе стержневого постоянного магнита и цифровых датчиков Холла. Приведены структурная схема и диаграмма работы предложенного информационного устройства управления движущимся объектом с определением направления перемещения одного объекта относительно другого и уменьшением их взаимной скорости в окрестности места точной остановки. Библ. 12, рис. 6.

Ключевые слова: магнитометрический преобразователь, постоянный магнит, напряженность магнитного поля, цифровой датчик Холла, движущийся объект, точная остановка.

MAGNETOMETRIC CONVERTERS OF INFORMATION DEVICES CONTROL OF MOBILE OBJECTS

Smirnyi M.F., Polivianchuk A.P.

O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv,

Marshal Bazhanov street, 17, Kharkiv, 61002, Ukraine.

E-mail: mfsmirny@gmail.com

Based on a two-dimensional potential problem, which is described by differential equations of the elliptical type, analytical expressions of orthogonal components of the tension of the outer magnetic field from the pole of the rod permanent magnet. These expressions are used as informative parameters when constructing magnetometric converters on the base of the bar permanent magnet and digital sensors of Hall. Presented a structural diagram and a diagram of the work of the proposed information device for the management of a moving object to determine the direction of the movement of one object relative to the other and the decrease in their mutual speed in the surroundings of the exact stop. References 12, figures 6.

Key words: magnetometric converter, permanent magnet, magnetic field tension, digital Hall sensor, of mobile object, exact stop.

1. Binns K., Laursen P. Analysis and calculation of the electric and magnetic fields. Moskva: Energiia, 1970. 376 p. (Rus)
2. Babic S. Improvement in the analytical calculation of the magnetic field produced by permanent magnet rings. *Progress in Electromagnetics Research C*. 2008. Vol. 5. Pp. 71-82.
3. Ravaut R., Lemarquand G., Babic S., Lemarquand V., Akyel C. Cylindrical magnets and coils: fields, forces, and inductances. *IEEE transactions on magnetic*. 2010. Vol. 46. No 9. Pp. 3585-3590.
4. Zaporozhets Yu.M. Qualitative analysis of characteristics of direct permanent magnets in magnetic systems with clearance. *Tekhnicheskaiia Elektrodinamika*. 1980. No 3. Pp. 19-24. (Rus)
5. Zaporozhets Yu.M., Kondratenko Yu.P., Shishkin O.S. Three-dimensional model for calculating magnetic induction in magnetsensitive system sensor slip. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2008. No 5. Pp. 76-79. (Ukr)
6. Cherkasova O.A. Study of magnetic field of permanent magnet by using computer simulation. *Geteromagnitnaia mikroelektronika*. 2014. No 17. Pp. 112-120. (Rus)
7. Boule O.B. Methods for calculating magnetic systems electrical apparatus. ANSYS program: training manual for Stud. of higher educational institutions. Moskva: Akademiia. 2006. 288 p. (Rus)
8. Karashetskyi V.P. Calculation of three-dimensional potential magnetic fields by the finite element method. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho Lisotekhnichnoho universytetu Ukrainy*. 2013. Vol. 23.12. Pp. 379-381. (Ukr)
9. Chatskis L.H. Study of static fields. *Electrichestvo*. 1973. No. 2. Pp. 47-50. (Rus)
10. Smyrnyi M.F. Device for the exact stopping of the vehicle. Patent Ukraine No 68793, 2012. (Ukr)
11. Smyrnyi M.F. Device for finding the center of a magnetic tag. Patent Ukraine No 76193, 2012. (Ukr)
12. Smyrnyi M.F. Device for the exact stopping of the vehicle, Patent Ukraine No 78227, 2013. (Ukr)

Надійшла 25.11.2019

Остаточний варіант 16.01.2020