

УДК 681.586.782

*Д-р техн. наук М.М. Бабаєв,  
канд. техн. наук М.Г. Давиденко,  
асп. В.Ю. Гребенюк*

## **АНАЛІЗ ВПЛИВУ ФЕРОМАГНІТНОЇ МАСИ РУХОМОЇ ОДИНИЦІ НА ІНДУКТИВНІ ДАТЧИКИ СИСТЕМ ЗАЛІЗНИЧНОЇ АВТОМАТИКИ**

**Вступ.** У наш час на об'єктах залізничного транспорту широко використовуються індуктивно-дротові датчики (ІДД) для точного виявлення транспортних засобів на певній ділянці шляху. ІДД призначені для визначення вільності або зайнятості рухомим складом контрольної ділянки шляху, наприклад ділянки підгіркового парку або на переїздах, і дозволяють підвищити безпеку руху поїздів при виконанні маневрових робіт. Застосування ІДД дозволяє збільшити продуктивність гірки за рахунок інформації про визначення напрямку руху транспортного засобу, підвищити точність при реєстрації проходження відчепа або баз довгобазних вагонів, підсилити контроль проходження стрілки рухомим складом, а також забезпечити виключення врізання стрілки при маневрах. На стрілочних

ділянках сортувальних гірок, які обладнані системою гіркової автоматичної централізації, ІДД застосовують для заміни педалей і рейкових кіл. У зв'язку з тим, що ІДД є невід'ємною ланкою в регулюванні руху поїздів, зокрема на сортувальних гірках, проведення подальших досліджень ІДД з метою їх удосконалення залишається актуальним завданням.

Чутливим елементом таких датчиків є укладений всередині рейкової колії на контрольній ділянці шляху індуктивний шлейф, що містить з'єднані між собою котушку індуктивності, резистор та ємність. При різних станах шляху індуктивність шлейфа має різні значення.

**Аналіз публікацій.** Матеріали дослідження і розрахунку параметрів котушок індуктивності наведені в роботах [1, 2] та ін. Однак у відомій літературі

недостатньо уваги приділено оцінці зміни індуктивності котушки під впливом різних факторів. Процес зміни електричних параметрів індуктивного шлейфа внаслідок наїзду на нього транспортної одиниці коротко розглянутий у роботах [3-5]. Аналіз даної літератури виявляє необхідність більш детального дослідження зміни індуктивності котушки індуктивного шлейфа з метою їх подальшого застосування та модернізації індуктивно-дротових датчиків.

**Мета роботи.** При знаходженні об'єкта в межах індуктивного шлейфа під впливом металевої маси транспортного засобу змінюються електричні параметри

індуктивного шлейфа, а, отже, від цього залежить функціонування самого датчика. Тому метою роботи є детальний аналіз зміни індуктивності котушки за вільності колії та при наявності над котушкою феромагнітної маси рухомої одиниці.

**Основна частина.** Розглянемо прямокутну котушку індуктивності, укладену між рейками так, що її сторони 2 та 4 паралельні рейкам, а сторони 1 та 3 перпендикулярні до них (рис. 1). Довжина сторони 2 дорівнює довжині сторони 4 та дорівнює  $a$  метрів, довжина сторони 1 дорівнює довжині сторони 3 та дорівнює  $b$  метрів.

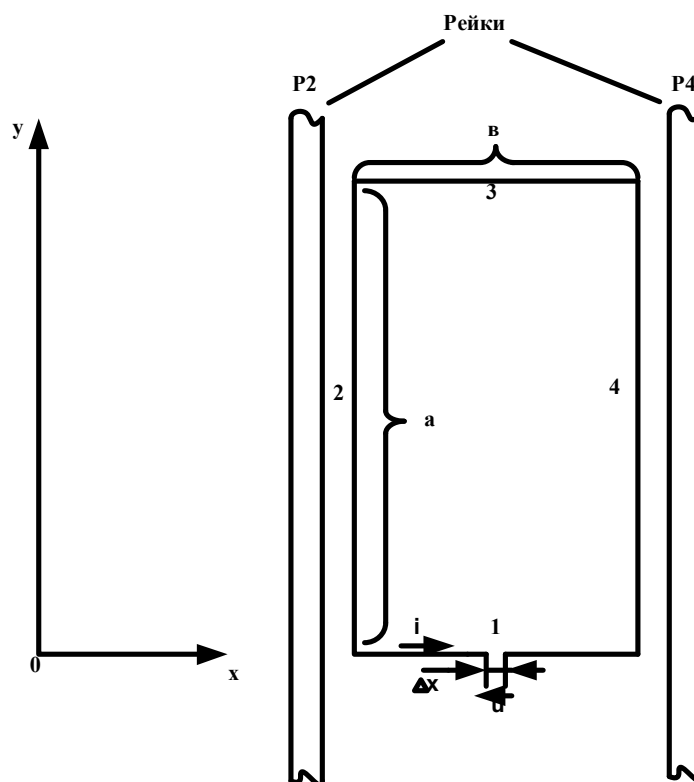


Рис. 1. Прямокутна котушка індуктивності, укладена між рейками

Вершину  $\Delta x$  проміжку між ввідними дротами вважатимемо знехтувано малою порівняно з вершиною  $b$ . Вид тієї самої конструкції в поперечному перерізі показано на рис. 2 (показано торці сторін 2 та 4 котушки, а сторони 1 та 3 не показано,

щоб не захаращувати графічних побудов), крім того, справжній радіус  $r_0$  дроту набагато менший порівняно до перерізу рейки, ніж це показано на рисунку.

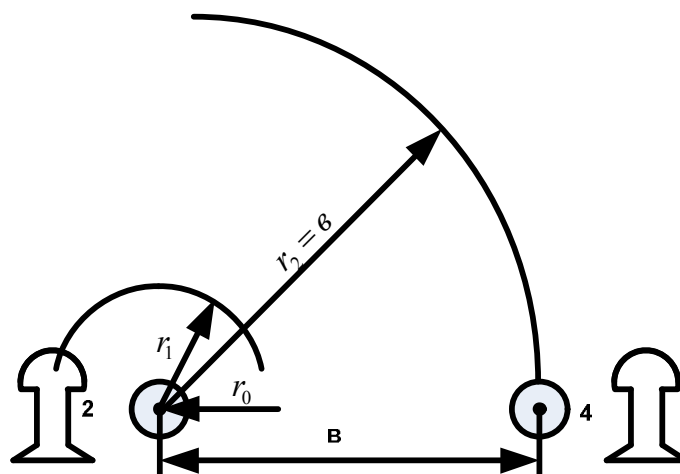


Рис. 2. Поперечний переріз прямокутної котушки індуктивності, укладеної між рейками

Як відомо, лінії рівної індукції довгого провідника зі струмом являють собою концентричні кола [6], площини яких перпендикулярні до осі цього провідника. Тому можна вважати, що магнітне поле, утворене сторонами 1 та 3 котушки не охоплює рейок. З огляду на це магнітний потік, утворений обома цими сторонами крізь площину котушки, дорівнює [7]

$$\Phi_{1,3} = \frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot i \cdot b}{\pi} \cdot \ln \frac{r_0}{r_0 + b}, \quad (1)$$

де  $i$  – миттєве значення струму в котушці;  
 $\mu \approx 1$  – магнітна проникність середовища (повітря та ґрунту);

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнітна проникність вакууму.

Тепер знайдемо величину  $\Phi_{2,4}$  магнітного потоку, утвореного сторонами 2 та 4 крізь площину котушки. Магнітне поле, утворене кожного з цих сторін, охоплює й сусідню рейку, розташовану на відстані  $r_1$  (рис. 2); протилежна рейка є дуже віддаленою ( $b \gg r_1$ ), і тому її

впливом можна знехтувати. З огляду на симетрію конструкції проаналізуємо поле, створене стороною 2 котушки, а потім просто подвоїмо величину магнітного потоку. Отже, сторона 2 утворює магнітне поле, лінії якого замикаються як через повітря та немагнітний ґрунт, так і, частково, через феромагнітну масу рейки (рис. 3).

Як відомо, під дією зовнішнього магнітного поля феромагнетик намагнічується в тому самому напрямку, який і в цього зовнішнього поля [8], і за величиною, пропорційною напруженості

$$H = \frac{i}{2\pi r_1}$$

цього поля. Індукцію магнітного поля рейки позначимо як  $\vec{B}_p$ , а індукцію магнітного поля дроту (сторона 2) котушки як  $\vec{B}_\Pi$ . Отже, індукція поля, утвореного сторонами 2 та 4 котушки, має дві складові – безпосередньо утворену струмом у дроті та утворену намагніченими рейками P2 та P4 (рис. 1, рис. 3):

$$\vec{B}_{2,4} = \vec{B}_{\Pi 2} + \vec{B}_{\Pi 4} + \vec{B}_{p2} + \vec{B}_{p4},$$

причому

$$\vec{B}_p = \mu_p \cdot \mu_0 \cdot \vec{k}(x, y) \cdot i, \quad (2)$$

де  $\mu_p$  – відносна магнітна проникність рейки;

$\vec{k}(x, y)$  – вектор, довжина якого залежить від взаємного просторового розташування рейки дроту та розташування точки  $(x, y)$  вимірювання індукції в рамці котушки; напрям цього вектора є напрямом індукції  $\vec{B}_p$  у вказаній точці рамки котушки.

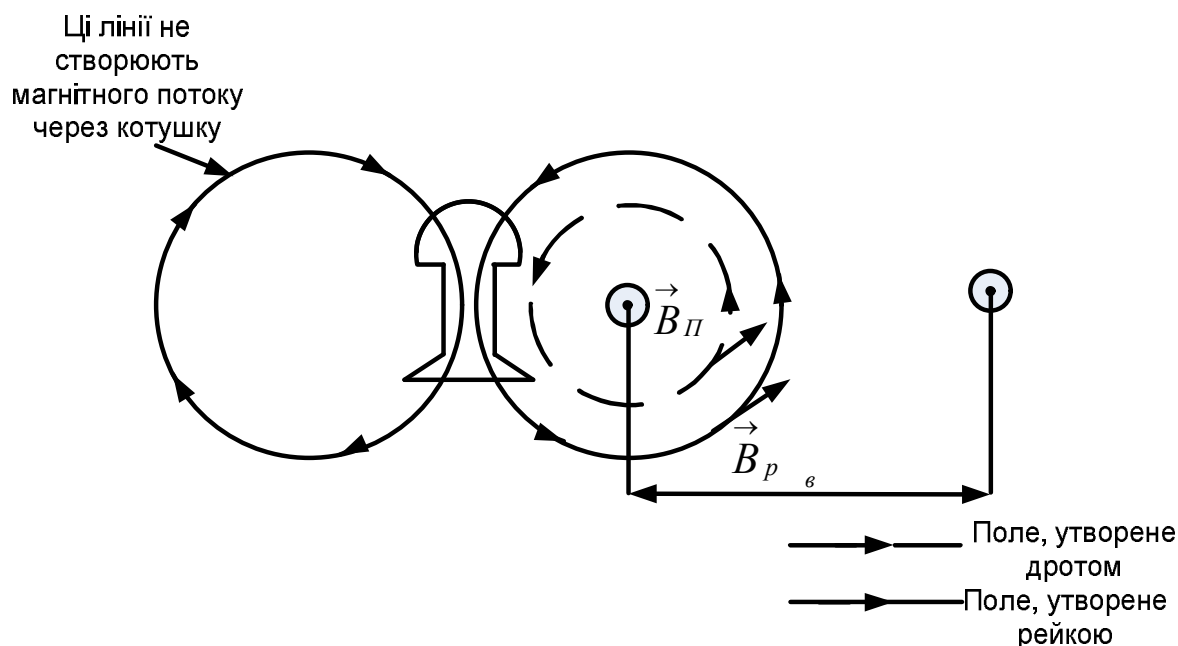


Рис. 3. Утворення магнітних полів

З урахуванням симетрії конструкції магнітний потік сумарного вектора індукції  $\vec{B}_{2,4}$  дорівнює

$$\Phi_{2,4} = \frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot i \cdot a}{\pi} \cdot \ln \frac{r_0}{r_0 + a} + 2 \int_S \vec{B}_p \cdot d\vec{S}, \quad (3)$$

де  $S$  – пласка поверхня рамки котушки.

Величина  $\mu$ , як і у формулі (1), дорівнює одиниці. З урахуванням співвідношення (2) маємо

$$\Phi_{2,4} = \frac{\mu_0 \cdot i \cdot a}{\pi} \cdot \ln \frac{r_0}{r_0 + a} + i \cdot 2 \mu_p \mu_0 \int_S \vec{k}(x, y) d\vec{S}. \quad (4)$$

Отже, сумарний магнітний потік, утворений крізь поверхню  $S$  рамки котушки одним її витком (сторони 1, 2, 3 та 4), дорівнює

$$\Phi = \Phi_{1,3} + \Phi_{2,4} = i \cdot \left[ \frac{\mu_0 \cdot b}{\pi} \cdot \ln \frac{r_0}{r_0 + b} + \frac{\mu_0 \cdot a}{\pi} \cdot \ln \frac{r_0}{r_0 + a} + 2\mu_p \mu_0 \int_S \vec{k}(x, y) d\vec{S} \right]. \quad (5)$$

Для котушки, яка має  $W$  щільно укладених витків, маємо

$$\Phi_w = W \cdot \Phi. \quad (6)$$

Потокозчеплення котушки дорівнює

$$\psi = W \cdot \Phi_w = W^2 \cdot i \cdot \left[ \frac{\mu_0 \cdot b}{\pi} \cdot \ln \frac{r_0}{r_0 + b} + \frac{\mu_0 \cdot a}{\pi} \cdot \ln \frac{r_0}{r_0 + a} + 2\mu_p \mu_0 \int_S \vec{k}(x, y) d\vec{S} \right]. \quad (7)$$

Водночас, потокозчеплення виражається через індуктивність котушки як

$$\psi = L \cdot i, \quad (8)$$

З виразів (7) та (8) знаходимо індуктивність котушки:

$$L = W^2 \cdot \left[ \frac{\mu_0 \cdot b}{\pi} \cdot \ln \frac{r_0}{r_0 + b} + \frac{\mu_0 \cdot a}{\pi} \cdot \ln \frac{r_0}{r_0 + a} + 2\mu_p \mu_0 \int_S \vec{k}(x, y) d\vec{S} \right]. \quad (9)$$

Тепер розглянемо випадок, в якому над котушкою розташовано феромагнітну масу рухомої одиниці (рис. 4).

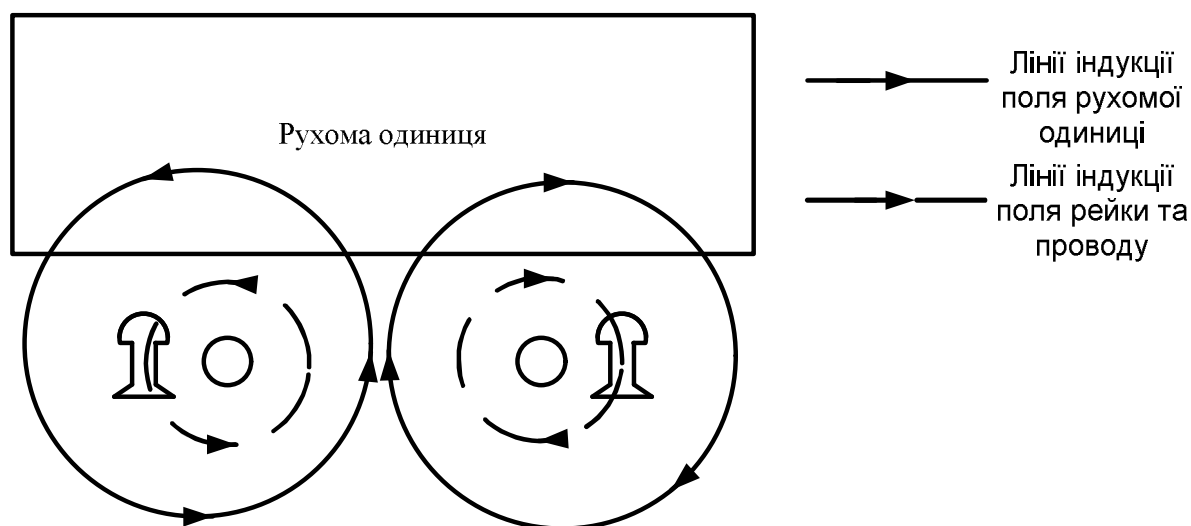


Рис. 4. Напрямки ліній індукції при розташуванні феромагнітної маси над котушкою

Ця маса намагнічується в тому самому напрямку, що й напрямок поля котушки за відсутності рухомої одиниці; аналогічно врахуванню наявності рейки маємо в площині котушки індукцію поля рухомої одиниці

$$\vec{B}_{PE} = \mu_{PE} \cdot \mu_0 \cdot \vec{k}_{PE}(x, y), \quad (10)$$

де  $\mu_{PE}$  – відносна магнітна проникність матеріалу рухомої одиниці.

Відповідний додатковий магнітний потік

$$\begin{aligned} \psi_{PE} = i \cdot W^2 \cdot \left[ \frac{\mu_0 \cdot b}{\pi} \cdot \ln \frac{r_0}{r_0 + b} + \frac{\mu_0 \cdot a}{\pi} \cdot \ln \frac{r_0}{r_0 + a} + 2\mu_p \mu_0 \int_S \vec{k}(x, y) d\vec{S} + \right. \\ \left. + \mu_{PE} \cdot \mu_0 \int_S \vec{k}(x, y) d\vec{S} \right], \end{aligned} \quad (12)$$

Водночас потокозчеплення виражається через індуктивність котушки як

$$\psi = L_{PE} \cdot i. \quad (13)$$

З виразів (12) та (13) знаходимо індуктивність котушки за наявності рухомої одиниці:

$$\begin{aligned} L_{PE} = W^2 \cdot \left[ \frac{\mu_0 \cdot b}{\pi} \cdot \ln \frac{r_0}{r_0 + b} + \frac{\mu_0 \cdot a}{\pi} \cdot \ln \frac{r_0}{r_0 + a} + 2\mu_p \mu_0 \int_S \vec{k}(x, y) d\vec{S} + \right. \\ \left. + \mu_{PE} \cdot \mu_0 \int_S \vec{k}(x, y) d\vec{S} \right], \end{aligned} \quad (14)$$

Оскільки напрямки всіх магнітних потоків через котушку в обох ситуаціях (без рухомої одиниці та з нею) збігаються, то сума додатків у формулі (12) більша аніж у формулі (7), звідки випливає, що  $L_{PE} > L$ .

**Висновок.** Таким чином, у результаті дослідження зміни індуктивності котушки

$$\Phi_{PE} = i \cdot \mu_{PE} \cdot \mu_0 \int_S \vec{k}(x, y) d\vec{S}, \quad (11)$$

де  $\vec{k}_{PE}$  – вектор, аналогічний вектору  $\vec{k}(x, y)$  з формули (2) за походженням, обумовлений наявністю феромагнітної рухомої одиниці.

З урахуванням потоку  $\Phi_{PE}$  маємо таку величину магнітного потокозчеплення крізь площину S котушки:

при вільності колії та за наявності над котушкою феромагнітної маси рухомої одиниці можна зробити висновок, що наявність феромагнітної рухомої одиниці над котушкою призводить до збільшення її індуктивності, що можна довести математично і зафіксувати електротехнічними методами.

### Список літератури

1. Калантаров, П.Л. Расчет индуктивностей [Текст]: справочная книга / П.Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин.– 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. – 488 с.
2. Немцов, М.В. Справочник по расчету параметров катушек индуктивности [Текст] / М.В. Немцов, Ю.М. Шамаев. – М.: Энергоиздат, 1981. – 136 с.
3. Индуктивно-проводной датчик для обнаружения транспортного средства в границах определенного участка пути [Текст]: пат. 2123953 Рос. Федерации: МПК В 61 L 1/08 / Боровков Ю.Г., Осокин А.А., Ильичев М.В., Карюкин С.Е.; заявитель и патентообладатель Государственное предприятие «Неаучно-исследовательский и проектно-конструкторский институт средства автоматизации на железнодорожном транспорте». – № 97105088/28; заявл. 01.04.1997; опубл. 27.12.1998, Бюл. № 9. – 5 с.
4. Устройство контроля проследования железнодорожного подвижного состава [Текст]: пат. 2248898 Рос. Федерации: МПК В 61 L 1/00, 1/16 / Самодуров В.И., Желобин В.Б., Кухаренко Т.В.; заявители и патентообладатели Самодуров В.И., Желобин В.Б., Кухаренко Т.В. – № 99103708/63; заявл. 22.02.1999; опубл. 27.03.2005, Бюл. № 9. – 9 с.
5. Индуктивно-проводной датчик [Текст]: пат. 2339530 Рос. Федерации: МПК В 61 L / 1/08 / Ноздрин К.А., Габдулхаев А.Б., Никитин А.Н., Демин Л.А.; заявитель и патентообладатель ОАО «Ижевский радиозавод». – № 2006 132935/11; заявл. 13.09.2006; опубл. 27.11.2008, Бюл. № 33. – 9 с.
6. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле [Текст] / Л.А. Бессонов. – М.: Высшая школа, 1978. – 232 с.
7. Инкин, А.И. Электромагнитные поля и параметры электрических машин [Текст] / А.И. Инкин. – Новосибирск: ООО «Издательство ЮКЭА», 2002. – 464 с.
8. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи [Текст] / Л.А. Бессонов. – М.: Гардарики, 2000. – 638 с.

**Ключові слова:** індуктивний шлейф, котушка індуктивності, магнітний потік, магнітне поле, ферромагнітна маса рухомої одиниці, потокозчеплення котушки.

#### *Анотація*

У статті проведено аналіз зміни індуктивності котушки при вільності колії і за наявності над котушкою ферромагнітної маси рухомої одиниці з метою подальшого використання індуктивних шлейфів в якості чутливих елементів індуктивно-дротових датчиків, що сприятиме їх подальшому удосконаленню для підвищення безпеки виконання маневрових робіт.

В статье проведен анализ изменения индуктивности катушки при свободности пути и при наличии над катушкой ферромагнитной массы подвижной единицы с целью дальнейшего использования индуктивных шлейфов в качестве чувствительных элементов индуктивно-проводных датчиков, что способствует их дальнейшему усовершенствованию для повышения безопасности выполнения маневровых работ.

The article analyzes the changes in the inductance of the coil is free paths and in the presence of a ferromagnetic coil mass of mobile units in order to further the use of inductive loops as sensing elements of the inductive-wire sensors that contribute to their further improvements to improve the safety performance of the maneuvers operations.