

УДК 656.216.2:625.096

О. М. ВОЗНЯК – доц., к. т. н., Львівська філія Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, старший науковий співробітник відділу залізнично-транспортних досліджень Львівського НДІ судових експертиз, ovozom@gmail.com, ORCID 0000-0002-7163-9026

МОДЕЛЬ ІНДУКТИВНОГО ДАТЧИКА КОНТРОЛЮ АВТОДОРОЖНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ У МЕЖАХ ЗАЛІЗНИЧНИХ ПЕРЕЇЗДІВ

Вступ

Постановка проблеми. Значне та неухильне зростання кількості транспортних засобів на мережі доріг, підвищення їх вантажопідйомності, швидкісних показників сприяє значному збільшенню інтенсивності руху та транспортного навантаження на залізничні переїзди, що спричиняє збільшення кількості дорожньо-транспортних пригод (ДТП). Це, у свою чергу, висуває нові вимоги до облаштування місць перетину автомобільних доріг та залізничних колій, їх утримання, застосування додаткових заходів щодо підвищення безпеки руху, запровадження профілактичних заходів щодо зміцнення дорожньої дисципліни водіїв.

Проблематикою є те, що при спрацюванні системи автоматичної переїзної сигналізації деякі автодорожні транспортні засоби продовжують перетинати залізничний переїзд, створюючи тим самим, загрозу безпеці руху, яка може спричинити небезпечну, а то й катастрофічну транспортну ситуацію. Статистика показує [1; 2], що хоча на залізничних переїздах відбувається тільки біля 4,5% від загальної кількості ДТП на мережі автодоріг, однак їх наслідки (як людські, так і матеріальні втрати) значно важчі. В Україні у середньому, на залізничних переїздах, з летальним наслідком кожна четверта ДТП (на мережі автодоріг 1 загиблий на 30 ДТП).

Тому існує потреба у пристроях, які контролюватимуть процес перетину меж залізничного переїзду автодорожніми транспо-

ртними засобами під час руху поїзда ділянкою наближення.

Аналіз публікацій. Один із таких способів запобігання загрози безпеці руху на переїздах залізничного транспорту за рахунок додаткового контролю переміщення транспортних засобів через залізничний переїзд та створення можливості впливу на ситуацію у його межах описаний у [3; 4; 5].

Суть способу полягає в тому, що при вступі поїзда на ділянку наближення крім вмикання загороджувальних пристроїв та автоматичної переїзної сигналізації додатково, у межах переїзду, проводиться контроль наявності автодорожніх рухомих одиниць за допомогою індуктивних датчиків, і, у разі їх наявності, особливо таких, які не рухаються, приймаються додаткові заходи, наприклад, вмикання мовної сигналізації, а для транспортного засобу, що рухається залізничною колією – загороджувальних світлофорів. Крім цього в рейкове коло ділянки наближення здійснюється трансляція кодів, які забезпечать зниження швидкості, або навіть і зупинку рухомої одиниці, яка рухається залізничною колією.

Модель датчика системи контролю. Основними компонентами системи із детектором у виді індуктивної петлі (рис. 1) є:

– Один або кілька витків ізольованого провідника у виді індуктивної петлі, яка виконана у невеликому гнізді у проїзній частині автомобільної дороги.

– Підвідні провідники до петлі від монтажної коробки на узбіччі та кабель від ящика до шафи із контролером управління.

– Блок електроніки (контролер управління), який розташований в шафі управління.

Принцип роботи системи полягає у зміні (зменшенні) значення індуктивності детектора внаслідок дії вихрових струмів, які наводяться у шасі, днищі, кузові та інших металевих елементах автомобіля, що знаходиться у межах дії детектора. Блок електроніки сприймає зміну індуктивності та надсилає імпульс до контролера, який фіксує проходження або наявності транспортного засобу у межах дії детектора.

Виходячи з того, що індуктивність лінії передачі збільшує величину індуктивності системи, то індуктивність петлі повинна бути більшою, аніж індуктивність самої лінії передачі [6]. Крім цього, зазначена система володіє власними паразитними ємністю та опором, а також зовнішньою паразитною ємністю, які впливають на верхнє обмеження робочої частоти контуру системи. Величина індуктивності петлі та з'єднувальних провідників також обмежує робочу частоту системи [7].

Для прогнозування продуктивності системи, була розроблена еквівалентна модель петлі та запрограмована на комп'ютері і використовувалась для розрахунку індуктивності, чутливості та добротності системи виявлення залежно від частоти, типу провідників петлі, відстані між провідниками у петлі, тощо.

Еквівалентна модель замкнутої системи містить модель індуктивного контуру (петлі), який змонтований у проїжджій частині та модель лінії передачі (з'єднувальних провідників між блоком та петлею).

Можливі варіанти реалізації укладання провідників (витків) індуктивної петлі (рис. 2) у формі: кола; квадрата (прямокутника); ромба; шестигранника, восьмигранника; у виді знаку ∞ (квадруполя).

Оскільки дана петля монтуватиметься у проїзній частині автодороги необхідно забезпечити максимальну простоту її встано-

влення. Тому зупинимося на петлі у формі квадрата (прямокутника).

Необхідно також зазначити, що петлі квадратної форми, у порівнянні з іншими формами петель менше відчувають вплив зовнішніх електромагнітних хвиль на значення індуктивності. Ця особливість таких петель пов'язана із формою їх укладання, адже така петля складається фактично із двох петель, які укладені назустріч одна одній, що взаємно компенсує вплив зовнішнього електромагнітного випромінювання. Тому, виходячи із зазначеного, потрібно розглянути можливість укладання петлі квадратної форми.

Рис. 3 ілюструє модель індуктивної петлі, яка містить резистивні, ємнісні та індуктивні складові [8], де прийняті наступні позначення: R_{cp} – опір діелектричних втрат матеріалу заповнення порожнини, де змонтована петля; R – активний опір петлі; R_g – опір заземлення; C_L^i – внутрішня та C_L^e – зовнішня ємності петлі; L_0 – власна та L_i – зовнішня індуктивності петлі.

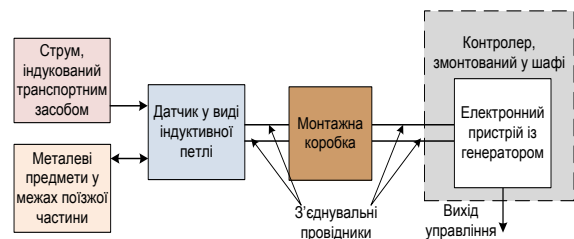


Рис. 1. Структура індуктивного детектора системи визначення (умовна)

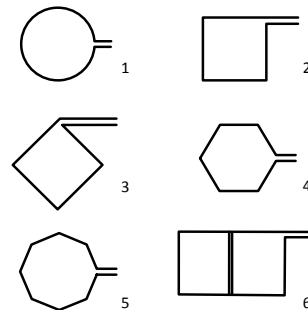


Рис. 2. Можливі варіанти укладання витків індуктивної петлі

Активний опір провідників R та опір заземлення R_g , які з'єднані послідовно і становлять опір петлі R_p :

$$R_p = R + R_g. \quad (1)$$

Активний опір провідників петлі на постійному струмі визначається із співвідношення [9]:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} = \frac{l}{\sigma \cdot S}, \quad (2)$$

де l – довжина провідника, м; S – його площа поперечного перерізу, м^2 ; ρ – питомий опір матеріалу провідника, Ом-м; σ – питома провідність провідника, См/м.

Активний опір провідників на змінному струмі за рахунок скін-ефекту збільшиться:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S_{ekv}}, \quad (3)$$

де S_{ekv} – еквівалентна площа перерізу провідника із урахуванням скін-ефекту, м^2 . У цьому випадку змінний струм протікає тільки поверхневим шаром провідника товщина якого d залежить від частоти і визначається [7]:

$$d = \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r \mu_0 \pi f}}, \quad (4)$$

де μ_0 – магнітна постійна, Гн/м; μ_r – відносна магнітна проникність провідника; f – робоча частота (Гц); ρ – питомий опір провідника, Ом-м. Тоді

$$S_{ekv} = \pi r^2 - \pi(r-d)^2 = \pi d(2r-d). \quad (5)$$

Домінуючим серед опорів є опір землі, який спричиняється струмами, наведеними у середовищі дорожнього покриття та матеріалу підстилки. Він обмежує чутливість петлі в місцях з вмістом вологи. Опір заземлення визначається як [7]:

$$R_g = \omega L_s \text{tg } \delta_g, \quad (6)$$

де $\text{tg } \delta_g$ – тангенс кута втрат матеріалу дорожнього покриття; L_s – індуктивність петлі, Гн; ω – кутова робоча частота, рад/с; f – лінійна робоча частота, Гц.

Опір діелектричних втрат матеріалу заповнення порожнини, у якій знаходиться петля визначається ємністю петлі, укладеної у порожнині проізої частини [10]:

$$R_{cp} = \frac{1}{G_{cp}} = \frac{1}{\omega C_p \text{tg } \delta_c}, \quad (7)$$

де $\text{tg } \delta_c$ – тангенс кута втрат в матеріалі заповнення; C_p – ємність петлі.

Ємність петлі має дві складові внутрішню та зовнішню (між провідниками петлі та стінками засипки) (рис. 4) [10]:

$$C_p = C_L^i + C_L^e, \quad (8)$$

де C_L^i – внутрішня; C_L^e – зовнішня.

Внутрішня ємність моделюється у виді паралельних ліній, які мають питому ємність, Ф/м [10]:

$$C' = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0}{\ln \left(\frac{D}{2r} + \sqrt{\frac{D^2}{4r^2} - 1} \right)}, \quad (9)$$

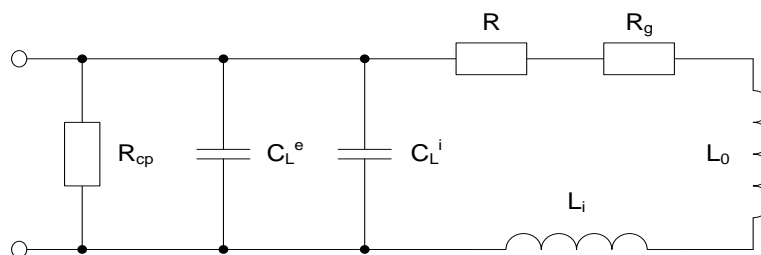


Рис. 3. Еквівалентна схема контуру індуктивної петлі

де D – відстань між центрами провідників (м); r – радіус провідника (м); ε – відносна діелектрична проникність матеріалу заповнення між провідниками; ε_0 – діелектрична проникність повітря.

Загальна ємність між сусідніми ізольованими витками петлі визначається як

$$C^i = C' \cdot P, \quad (10)$$

де P – периметр петлі (м).

Внутрішня ємність петлі, яка складається із n витків визначається як [10]:

$$C_L^i = \frac{4(n-1)}{3n^2} C' P, \quad (11)$$

де n – кількість витків петлі.

Зовнішня ємність одиниці довжини провідника виражається як

$$C' = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon}{\ln\left(\frac{2h}{\pi r}\right)}, \quad (12)$$

де h – ширина пропили щілини, м.

Повна зовнішня ємність провідників петлі становить

$$C = C' P. \quad (13)$$

Зовнішня ємність прямо пропорційна діелектричній проникності ущільнювального матеріалу засипки. Якщо засипка гігроскопічна (поглинає і утримує воду) або незаповнена (вода проникає між провідниками), зміна ємності буде значною. Тому, для правильної роботи системи на частотах, більших за 10 кілогерц, значення ємності системи повинне бути зведене до мінімуму.

Індуктивність петлі L_S , так само, як і ємність має дві складові – внутрішню (власну L_i) та зовнішню (внесену L_e) [6]:

$$L_S = L_e + L_i, \quad (14)$$

де L_i – частина від загальної індуктивності, спричинена енергією полів всередині провідника (власна); L_e – частина від загальної індуктивності, спричинена енергією полів ззовні провідника (зовнішня).

Зовнішню індуктивність провідника із довжиною l та радіусом r визначають із виразу [6; 10]:

$$L_e = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln\left(\frac{2l}{r}\right) - 1 \right). \quad (15)$$

Внутрішню індуктивність провідника можна визначити із виразу [6; 8]:

$$L_i = \frac{\mu_r \mu_0 l}{8\pi}. \quad (16)$$

Індуктивність одного витка петлі прямокутної форми (рис. 5) складається із суми індуктивностей кожної із сторін прямокутника та взаємних індуктивностей між паралельними сторонами [6]:

$$L_{P1} = L_{S1} + L_{S2} + L_{S3} + L_{S4} + M_{13} + M_{24} + M_{31} + M_{42}, \quad (17)$$

Оскільки $L_{S1} = L_{S3}$; $L_{S2} = L_{S4}$; $M_{13} = M_{31}$; $M_{24} = M_{42}$ отримаємо:

$$L_{P1} = 2(L_{S1} + L_{S2} + M_{13} + M_{24}), \quad (18)$$

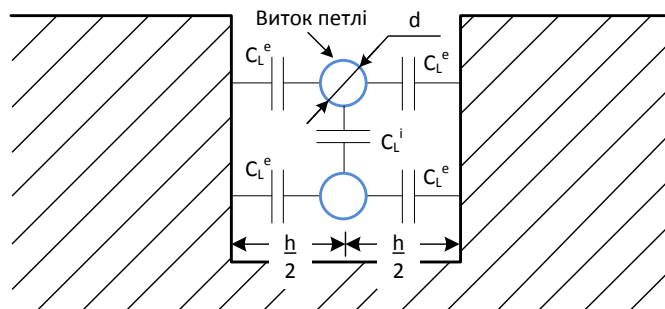


Рис. 4. Ємнісний зв'язок між провідниками петлі та гніздом

де L_{S1}, L_{S2} – індуктивність провідника сторони прямокутника, Гн:

$$L_S = \frac{\mu_0 \mu_r l}{2\pi} \left\{ \ln \left[\frac{l}{r} + \sqrt{1 + \left(\frac{l}{r}\right)^2} \right] - \sqrt{1 + \left(\frac{r}{l}\right)^2} + \frac{r}{l} \right\}, \quad (19)$$

де l – довжина відповідної сторони прямокутника петлі, м; r – радіус провідника петлі, м; M_{13}, M_{24} – взаємна індуктивність між парою паралельних провідників, розташованих у просторі з відносною проникністю μ_r , наведених на рис. 6 (протилежними сторонами прямокутника петлі) [6]:

$$M_{ij} = \pm \frac{\mu_0 \mu_r l}{2\pi} \left\{ \ln \left[\frac{l}{D} + \sqrt{1 + \left(\frac{l}{D}\right)^2} \right] - \sqrt{1 + \left(\frac{D}{l}\right)^2} + \frac{D}{l} \right\}, \quad (20)$$

де μ_0 – магнітна постійна, Гн/м; l – довжина провідників, м; D – відстань між провідниками, м.

Отримана формула дає розбіжність із точним значенням порядку 1,5 %. Збільшити точність визначення індуктивності за цією формулою на певній частоті можна шляхом урахування товщини скін-шару:

$$r_{ekv} = \sqrt{2 \cdot d \cdot r - d^2}, \quad (21)$$

де r – радіус провідника, м; d – товщина скін-шару, м, визначається за (4).

Індуктивність петлі, яка складається із n рівномірно розташованих та однакових за розмірами (ідентичних) витків визначається як [6; 10]:

$$L_P = n \cdot L_{S1} + 2(n-1)M_{12} + 2(n-2)M_{13} + \dots \approx n^2 L_{S1}, \quad (22)$$

де n – кількість витків; L_{S1} – індуктивність одного витка, Гн.

Індуктивність петель квадрупольної форми визначається, виходячи із моделей: рис. 7, яка ілюструє петлю квадрупольної форми із двома витками, та рис. 8 – із багатьма (n) витками.

Отже, індуктивність петлі квадрупольної форми з n витками становить [6]:

$$L_P = 2nL_{S1} + 2nM_{12} + 4(n-1)M_{13} + 4(n-1)M_{14} + 4(n-2)M_{15} + 4(n-2)M_{16} \dots \approx (2n)^2 L_{S1}. \quad (23)$$

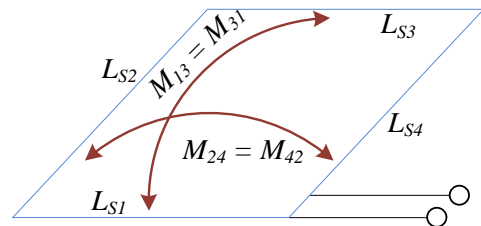


Рис. 5. Петля у виді прямокутника

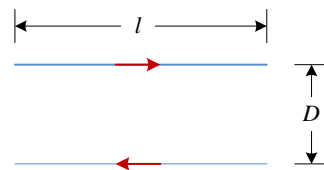


Рис. 6. Паралельні провідники зі струмом

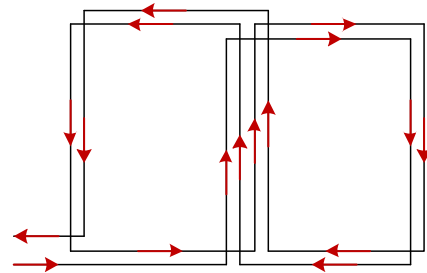


Рис. 7. Модель петлі квадрупольної форми із двома витками

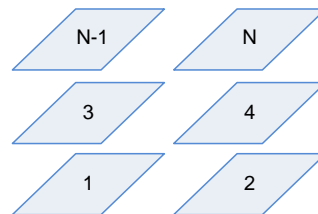


Рис. 8. Модель петлі квадрупольної форми із багатьма витками

Модель з'єднувальних провідників між блоком електроніки та петлею так само, як і модель самої петлі містить резистивні, ємнісні та індуктивні складові (див. рис. 3).

Як резистивна так і ємнісна складові з'єднувальних провідників визначається аналогічно, як і для петлі за формулами (3) та (12) – (13) відповідно.

Індуктивну складову визначають, виходячи із співвідношення [6; 10]:

$$L_K = 2 \cdot (L_0 + M_{12}), \quad (24)$$

де L_0 – повна індуктивність одного з'єднувального провідника і визначається за формулами (14) – (16) або (19), Гн; M_{12} – взаємна індуктивність між парою паралельних провідників, розташованих у просторі визначається за формулою (20).

Із достатньою точністю (біля 1,5%) індуктивність двох паралельних провідників із радіусом r , довжиною l та відстанню між ними D (див. рис. 6) визначається за формулою Марка Томпсона [7]:

$$L_K = \frac{\mu_0 \mu_r l}{\pi} \ln \left(\frac{D}{r} + \frac{1}{4} - \frac{D}{l} \right). \quad (25)$$

Збільшити точність визначення індуктивності за цією формулою на певній частоті можна шляхом уведення замість реального значення радіуса провідника його еквівалентне значення r_{ekv} , яке враховуватиме товщину скін-шару (16).

Модель системи індуктивної петлі рис. 3 зводиться до моделі, наведеної на рис. 9, де

$$R_{in}^L = \frac{G_P}{G_P^2 + \left(\omega C_P - \frac{1}{\omega L_S} \right)^2}, \quad (26)$$

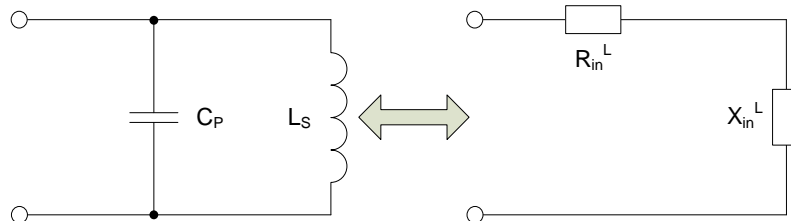


Рис. 9. Еквівалентна модель схеми індуктивної петлі

та

$$X_{in}^L = \frac{1}{\omega L_S} - \omega C_P}{G_P^2 + \left(\omega C_P - \frac{1}{\omega L_S} \right)^2}. \quad (27)$$

Добротність петлі визначається як:

$$Q_{in}^L = \frac{X_{in}^L}{R_{in}^L} = \frac{1}{\omega L_S} - \omega C_P}{G_P}. \quad (28)$$

Власна резонансна частота петлі визначається із виразу:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_S C_P}}. \quad (29)$$

Добротність системи характеризує її ефективність та якість її роботи. При низькому вмісті вологи в покритті та земляному полотні може збільшитися опір контуру заземлення так, що добротність системи індуктивної петлі зменшиться, тим самим зменшуючи чутливість блоку електроніки. Значна ємність петлі також знижує добротність системи.

Днище (шасі) транспортного засобу, що проходить над вмонтованою у полотні автомобільної дороги індуктивною петлею становить горизонтальний об'єкт, який можна змодельовати як провідну прямокутну пластину ширина якої визначається шириною транспортного засобу, її довжина дорівнює довжині транспортного засобу на деякій середній висоті шасі (Рис. 10, а).

Таку пластину подають у виді сітки прямокутної форми із площею, яка дорівнює площі пластини [6; 9] (Рис. 10, *b*). У такій сітці усі індуковані внутрішні потоки у межах її периметру взаємно компенсуються, тому ними нехтують. Це спричиняє один струм, який протікає тільки її периметром і еквівалентно одному витку петлі із замкнутими накоротко виводами (Рис. 10, *c*). У результаті, отримано трансформатор із повітряним осердям [9] у якому первинну обмотку становить датчик у виді індуктивної петлі, змонтованої у проїзній частині дороги, а вторинну – петля прямокутної форми із замкнутими накоротко виводами ширина якої визначається шириною транспортного засобу, її довжина дорівнює довжині транспортного засобу (рис. 10, *d*).

Взаємна індуктивність між петлею і замкнутим накоротко витком, який виконує роль автомобіля (див. рис. 10) визначається із співвідношення [6]:

$$M_{21} = \frac{n_2 \cdot \Phi_{21}}{I_1}, \quad (30)$$

де M_{21} – взаємна індуктивність між обмотками, Гн; n_2 – кількість витків у вторинній обмотці; Φ_{21} – магнітний потік між обмотками, Вб; I_1 – струм первинної обмотки, А.

Чутливість детектора у виді індуктивної петлі визначається як:

$$K_L = \frac{L_{nv} - L_v}{L_{nv}} \cdot 100\% = \frac{\Delta L}{L} \cdot 100\%, \quad (31)$$

де L_{nv} – індуктивність петлі за відсутності та L_v – індуктивність петлі за наявності в її межах автомобіля, Гн.

Чутливість трансформатора із повітряним осердям, наведеного на рис. 10, *d*, визначається із співвідношення:

$$K_T = K \cdot 100\% = \frac{(M_{21})^2}{L_{11} \cdot L_{22}} \cdot 100\%, \quad (32)$$

де K_T – коефіцієнт зв'язку між його обмотками; M_{21} – взаємна індуктивність між його обмотками, Гн; L_{11} , L_{22} – індуктивності первинної та вторинної обмоток, Гн.

Індуктивність петлі із шириною l_1 , змонтованої у проїжджій частині автодорожнього покриття визначається [6]:

$$L_{11} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_{r11} \cdot (n_1)^2 \cdot S_1 \cdot F_1}{l_1}. \quad (33)$$

Індуктивність короткозамкнутого витка (автомобіля) визначається із виразу:

$$L_{22} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_{r22} \cdot (n_2)^2 \cdot S_2 \cdot F_2}{l_2}. \quad (34)$$

Взаємна індуктивність між короткозамкнутим витком та петлею визначається із виразу [6; 9]:

$$M_{21} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_{r21} \cdot n_1 \cdot S_2 \cdot F_1}{d_{21}}, \quad (35)$$

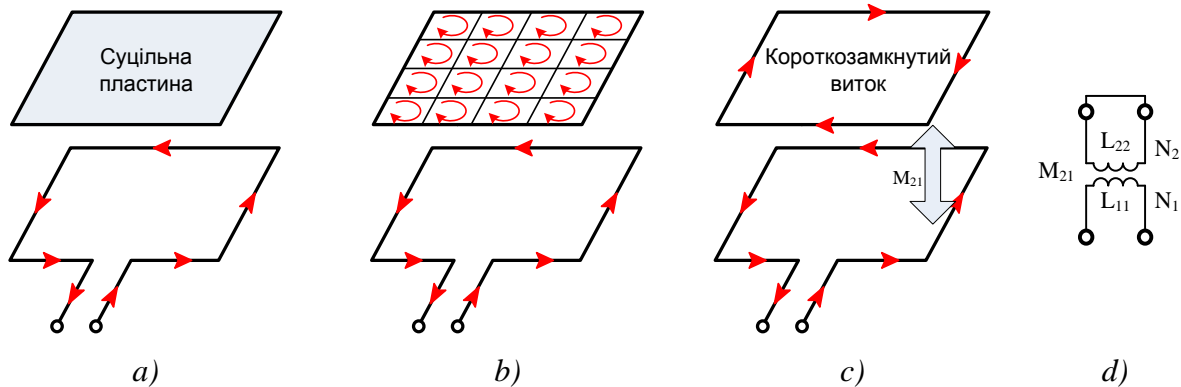


Рис. 10. Модель взаємодії днища (шасі) автомобіля із петлею

де μ_{r11} , μ_{r22} , μ_{r21} – відповідно відносні магнітні проникності матеріалу, у який поміщена петля, автомобіля, та проміжку трансформатора; n_1 , $n_2 = 1$ – відповідно кількість витків у первинній та вторинній обмотках; S_1 , S_2 – відповідно площі петлі та ходової автомобіля, m^2 ; d_{21} – відстань між петлею і короткозамкнутим витком (відстань від поверхні дороги до днища автомобіля), m ; F_1 , F_2 – коефіцієнти урахування неоднорідності магнітного потоку у межах індуктивної петлі (у проїзній частині) та за її межами (у дорожньому просвіті, автотранспортному засобі, тощо) відповідно.

Отже, враховуючи вирази (32) – (35) коефіцієнт зв'язку виражається як:

$$K = \frac{S_2 \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot F_1}{\mu_{r11} \cdot \mu_{r22} \cdot S_1 \cdot (d_{21})^2 \cdot F_2}. \quad (36)$$

Рівняння (36) показує, що чутливість:

- зменшується для петель із площею більшою, аніж площа проекції днища авто на дорогу (це свідчить про те, що для збільшення чутливості потрібно, щоб площа петлі була меншою за найменшу площу проекції автомобіля, який виявлятиметься);
- зменшується пропорційно до квадрату відстані днища транспортного засобу від петлі (для виявлення транспортних засобів із значним дорожнім просвітом необхідно, щоб ширина петлі за розмірами була приблизно така-ж як і ширина автомобіля);
- не залежить від кількості витків петлі;
- обернено пропорційна відносній магнітній проникності ущільнювального матеріалу засипки (якщо засипка гігроскопічна чи незаповнена, чутливість петлі знижується);
- обернено пропорційна коефіцієнту урахування неоднорідності магнітного потоку за межами петлі (дорожній просвіт, транспортний засіб, тощо) та прямо пропорційна коефіцієнту урахування неоднорідності магнітного потоку у межах петлі (проїзна частина), тому петлі квадрупольної форми володіють більшою чутливістю.

Оскільки для збільшення чутливості петлі при виявленні транспортних засобів із значним дорожнім просвітом необхідно, щоб ширина петлі за розмірами була приблизно така-ж як і ширина автомобіля вибиратимемо ширину петлі за базовими розмірами автомобілів. Аналіз літератури [11; 12] показує, що на мережі автодоріг та через залізничні переїзди рухаються автотранспортні засоби із шириною, яка знаходиться в межах від 1 500 мм до 2 500 мм, тому, з метою ефективної фіксації усіх типів автодорожніх транспортних засобів виберемо для ширини петлі середнє значення, тобто 2 м ($l_1 = 2$ м).

Як впливає із (36), для ефективної фіксації автотранспортних засобів, площа петлі повинна бути меншою за площу днища (шасі) авто, тому вибираємо довжину петлі 1 м ($l_2 = 1$ м). У цьому випадку площа обраної петлі прямокутної форми становитиме $S_1 = 2$ м², а периметр $P = 6$ м. Петля квадрупольної форми із зовнішніми розмірами 1x2 м також володітиме площею $S_1 = 2$ м², однак периметром $P = 8$ м.

Для вибору перерізу провідника обмежимося частотою, на якій у мідному провіднику проявлятиметься скін-ефект. Оскільки, згідно (36), кількість витків не впливає на чутливість петлі, то цей параметр визначатимемо тільки з точки зору забезпечення номінальної мінімальної індуктивності, яка впливає на стабільність роботи системи. Необхідно врахувати і те, що значна кількість витків петлі збільшує ємність контуру, знижуючи власну частоту коливань. Крім цього, для забезпечення стабільної роботи системи, необхідно, щоб індуктивність петлі не була меншою за індуктивність з'єднувальних провідників лінії.

Отже, початковими і граничними умовами для моделі будуть наступні: матеріал провідників – мідь; форма петлі – прямокутник та квадруполь; ширина петлі – 2 м; довжина – 1 м; площа – 2 м² периметр 6 та 8 м відповідно. Петля монтуватиметься у щілині, яка виконується у виді пропилу у

дорожньому покритті і заповнена асфальтом. Параметри засипки щілин, де монтується петля [13]: матеріал – асфальт; відносна діелектрична проникність – 4,5; тангенс кута втрат – 0,15...0,2; ширина щілини – 5 мм; відносна діелектрична проникність води – 81.

У якості провідника петлі використаємо одножильний монолітний провідник марки ПВ-1 0,5. Його параметри [14]: переріз жил – 0,5 мм²; діаметр жил – 0,8 мм; зовнішній діаметр провідника – 2,4 мм; матеріал ізоляції – полівінілхлорид; відносна діелектрична проникність ізоляції – 3,7; тангенс кута втрат ізоляції – $3...8 \times 10^{-2}$.

Скін-ефект у такому провіднику проявлятиметься на частотах, вищих за 80 кГц. Тому визначимо ємність, індуктивність, опір, добротність та резонансну частоту петлі із кількістю витків від 1 до 10 без урахування скін-ефекту. Обчислення здійснюватимемо для петель прямокутної та квадратурної форми із урахуванням з'єднувальних провідників за формулами (1)–(23).

Значення індуктивності, ємності та опору 50 м з'єднувальних провідників становлять відповідно: $L_w = 163,743 \mu\text{Гн}$; $C_w = 4,969 \text{ нФ}$; $R_w = 10,919 \text{ Ом}$.

Параметри системи, яка складається із петлі та з'єднувальних провідників наведені у табл. 1, у якій: n – кількість витків петлі; L , C , R – відповідно її повні індуктивність, ємність та опір; Q – її добротність; $f_{\text{рез}}$ – власна резонансна частота.

Оскільки, для забезпечення стабільної роботи системи та достатньої чутливості петлі, її індуктивність повинна бути більшою за індуктивність з'єднувальних провідників між петлею та блоком електроніки, то при розмірах петлі 1x2 м її індуктивність повинна бути не менше $L_w = 163,743 \mu\text{Гн}$, що, згідно проведених обчислень, відповідає індуктивності петлі при кількості витків більше трьох. Максимальна добротність системи, яка складається із петлі та з'єднувальних провідників буде при 4 витках. Отже, виходячи із зазначеного, приймаю кількість витків петлі – $n = 4$.

Отже, петля повинна бути виконана у виді прямокутника, або квадратурної форми; мати 4 витки одножильного монолітного провідника марки ПВ-1 0,5; та розміри: ширина – 2 м та довжина – 1 м. З'єднувальні провідники між петлею та блоком електроніки повинні мати довжину не більше 50 м.

Таблиця 1

Ємність, індуктивність, опір, добротність та резонансна частота системи, яка складається із петель прямокутної і квадратурної форми із кількістю витків від 1 до 10 та з'єднувальних провідників

n, вит	Петля прямокутної форми					Петля квадратурної форми				
	L, мкГн	C, нФ	R, Ом	Q	F, кГц	L, мкГн	C, нФ	R, Ом	Q	f, кГц
1	174,641	5,239	18,720	1,51	166,384	175,452	5,329	19,438	1,52	164,589
2	207,335	5,611	28,704	2,16	147,561	210,579	5,825	30,165	2,14	143,705
3	261,824	5,870	35,671	2,49	128,379	269,124	6,170	37,651	2,44	123,505
4	338,109	6,127	42,562	2,60	110,582	351,087	6,512	45,055	2,51	105,254
5	436,190	6,386	49,532	2,57	95,361	456,468	6,858	52,542	2,47	89,951
6	556,067	6,648	56,569	2,47	82,778	585,267	7,208	60,102	2,36	77,490
7	697,740	6,912	63,656	2,35	72,474	737,483	7,559	67,714	2,24	67,406
8	861,208	7,177	70,777	2,23	64,017	913,118	7,913	75,363	2,11	59,209
9	1046,472	7,443	77,923	2,10	57,027	1112,171	8,268	83,036	1,99	52,485
10	1253,532	7,710	85,085	1,96	51,194	1334,642	8,624	90,726	1,87	46,912

З метою перевірки отриманих значень індуктивностей петлі були проведені експерименти, в ході яких перевірялося значення індуктивності петлі та величина зміни її індуктивності при наявності та відсутності в її межах автомобіля.

Експериментальні вимірювання індуктивності петлі проводилися за схемою, наведеною на рис. 11.

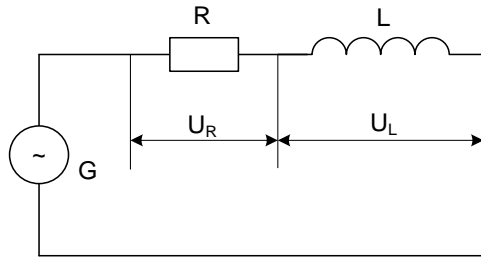


Рис. 11. Схема проведення вимірювань

Для заданої схеми [12]:

$$U_R = I_R \cdot R, \quad (37)$$

$$U_L = I_L \cdot X_L, \quad (38)$$

де U_R – падіння напруги на резисторі; R – номінал резистора; U_L – падіння напруги на індуктивній петлі; X_L – реактивний опір індуктивної петлі, який рівний:

$$X_L = \omega L = 2\pi f L, \quad (39)$$

де f – частота коливань генератора; L – величина індуктивності петлі.

Із рівняння (37) отримаємо:

$$I_R = \frac{U_R}{R}. \quad (40)$$

Із рівнянь (38) та (39) отримаємо:

$$I_L = \frac{U_L}{2\pi f L}. \quad (41)$$

Оскільки $I_R = I_L = I$, то

$$I = \frac{U_R}{R} = \frac{U_L}{2\pi f L}. \quad (42)$$

Звідси визначимо індуктивність петлі:

$$L = \frac{U_L}{U_R} \cdot \frac{R}{2\pi f}. \quad (43)$$

У якості індуктивної петлі було використано 4 витки провідника марки ПБ-1 0,5, укладених у формі прямокутника із розмірами 1x2 м. Периметр петлі – 6 м.; Довжина провідника – 24 м.

Для вимірювання значень індуктивності петлі за наявності автомобіля у її межах використовувався автомобіль Volkswagen Golf2 1986 року випуску. Крім цього аналогічні вимірювання проводилися із автомобілем Renault Megane 2005 року випуску та Chevrolet Aveo 2003 року випуску. Результати вимірювань для усіх зазначених автомобілів співпадають із розбіжністю, яка менше 0,5%, тому надалі наводяться дані тільки для автомобіля Volkswagen Golf2.

Вимірювання параметрів індуктивної петлі за наявності автомобіля у її межах здійснювалося при повному знаходженні автомобіля над нею, тобто у момент мінімального значення індуктивності петлі.

На рис. 12 наведено отримані залежності значення індуктивності петлі від несучої частоти генератора, які визначені шляхом вимірювань напруг на опорі та індуктивній петлі. Графіки отриманих залежностей зміни індуктивності петлі та її чутливості у цьому випадку наведені на рис. 13.

Для зменшення впливу на індуктивність петлі зовнішніх електромагнітних випромінювань було використано форму петлі у виді квадруполя. У цьому випадку периметр петлі залишається таким самим, як і досліджуваної петлі прямокутної форми (6 м), а довжина петлі становить 8 м, довжина провідників – 32 м.

Отримані залежності значення індуктивності такої петлі на різних робочих частотах у межах від 2 до 120 кГц наведені на рис. 14, а графіки залежності зміни індуктивності та її чутливості у цьому випадку наведені на рис. 15.

Аналіз графіків рис. 12–15 показує, що: найбільша чутливість усіх петель до наяв-

ності автомобіля на частотах у межах від 7,5 до 35 кГц (> 10%) (максимум – на частоті 20 кГц); чутливість петель квадруполюльної форми більша за чутливість петель у формі прямокутника; чутливість петель на частотах більших 90 кГц знижується.

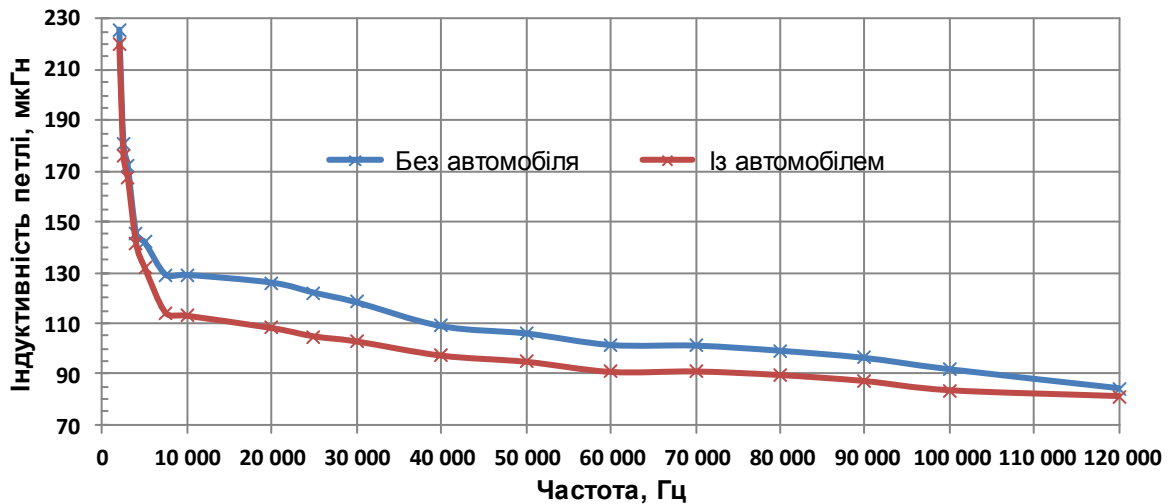


Рис. 12. Індуктивність петлі прямокутної форми за наявності та відсутності автомобіля у межах її периметру на різних робочих частотах

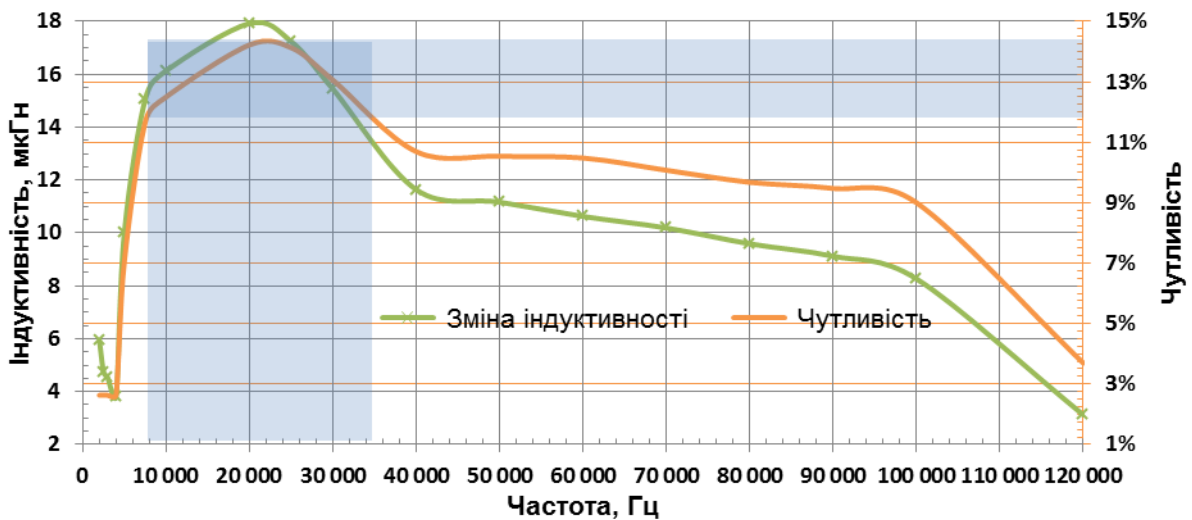


Рис. 13. Зміна індуктивності та чутливість петлі прямокутної форми за наявності та відсутності автомобіля у межах її периметру на різних робочих частотах

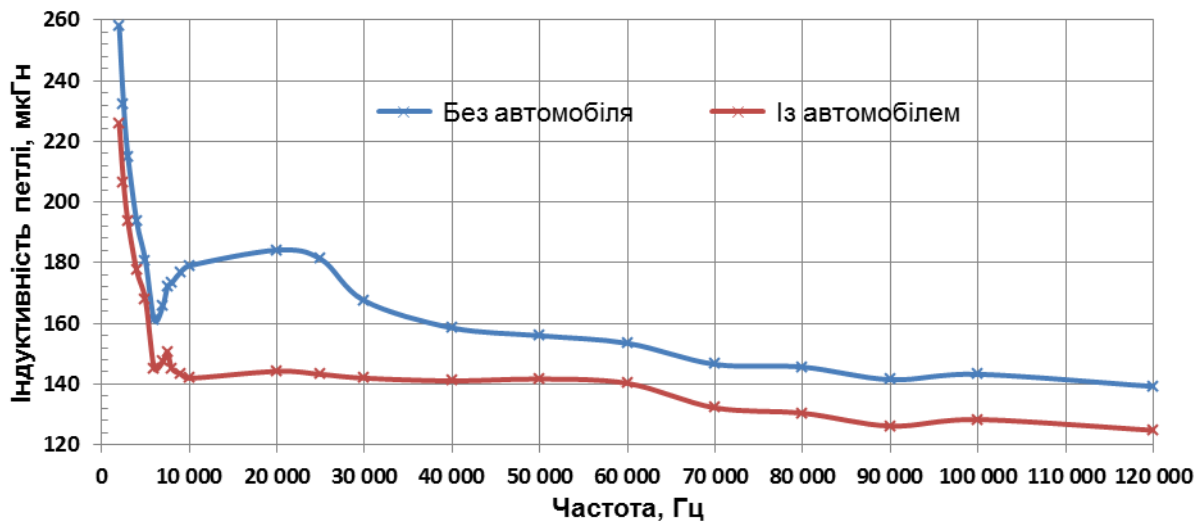


Рис. 14. Індуктивність петлі квадрупольної форми за наявності та відсутності автомобіля у межах її периметру на різних робочих частотах

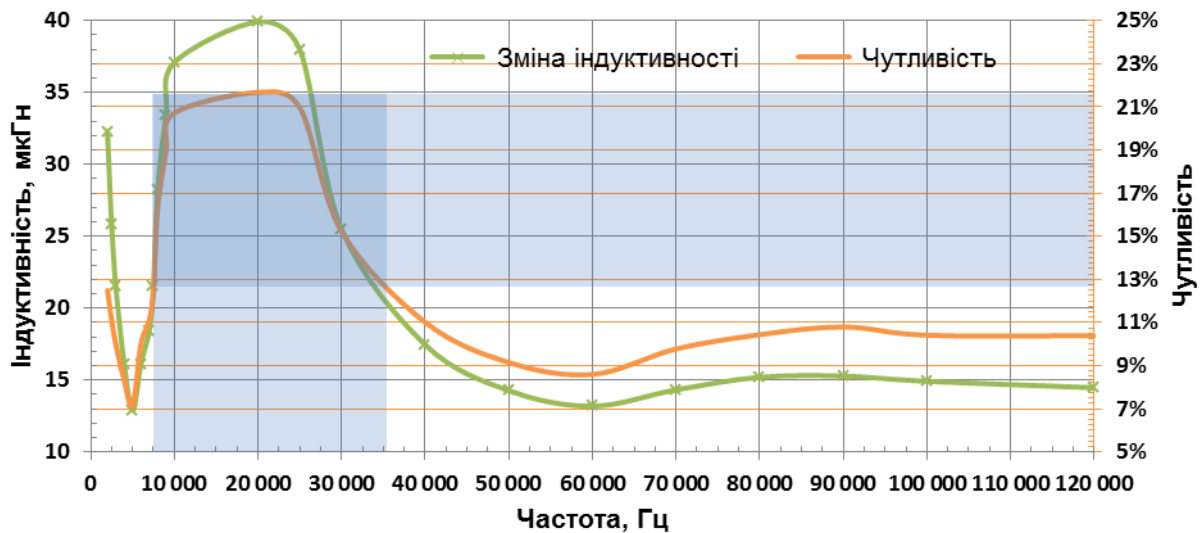


Рис. 15. Зміна індуктивності та чутливості петлі квадрупольної форми за наявності та відсутності автомобіля у межах її периметру на різних робочих частотах

Бібліографічний список

1. Україна у цифрах у 2013 році. Статистичний збірник / Під ред. Осауленка О.Г. – Державна служба статистики. – К.: ТОВ «Видавництво «Консультант», 2014. – 240 с.
2. Горбаха, М. Аналіз стану безпеки руху на автомобільному (загального користування, відомчому), міському електричному та залізничному транспорті, польотів на авіаційному транспорті, судноплавства на морському та річковому транспорті в Україні за 2013 рік / М. Горбаха, В. Коськовецький, Д. Міков, Д. Саламатнікова, І. Сулицька. – Департамент безпеки Міністерства інфраструктури України. – К.: Міністерство інфраструктури України, 2014. – 117 с.
3. Патент UA №93602 МПК B61L 29/00 Спосіб запобігання загрозі безпеки руху у межах залізничного переїзду / Возняк О.М., Гаврилюк В.І.; заявник Возняк О.М. – u2014 04253; заяв. 22.04.2014, опублік. 10.10.2014, Бюл. №19.
4. Патент UA №105415 МПК B61L 29/00; G08G 1/042; G08G 1/16 Спосіб підвищення безпеки руху на залізничному переїзді за рахунок управління ситуацією в його ме-

- жах / Возняк О.М., Кусяк О.П.; заявник Возняк О.М. – u2015 05348; заяв. 02.06.2015, опублік. 25.03.2016, Бюл. №6.
5. Возняк, О. М. Забезпечення безпеки руху на залізничних переїздах : Монографія / О. М. Возняк, В. І. Гаврилюк.; Під ред. Гаврилюка В. І. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2016. – 282 с. (ISBN 978-966-8471-70-4).
 6. Калантаров, П. Л. Расчет индуктивностей: Справочная книга / П. Л. Калантаров, Л. А. Цейтлин. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1986. – 488 с.
 7. Antonini, G. Review of Clayton R. Paul Studies on Multiconductor Transmission Lines / G. Antonini, A. Orlandi, S.A. Pignari. // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2013. Vol. 55. – No. 4. – Aug. – pp. 639 - 647. (DOI: 10.1109/TEMC.2013.2265038).
 8. Holloway, C. L. Partial and Internal Inductance: Two of Clayton R. Paul's Many Passions / C. L. Holloway, E. F. Kuester, A. E. Ruehli, G. Antonini. // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2013. Vol. 55. – No. 4. – pp. 600-613.
 9. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учебник / Л. А. Бессонов. – 10-е изд. – М.: Гардарики, 2002. – Ч.1. – 638 с.
 10. Walker, C. Capacitance, Inductance, and Crosstalk Analysis / C. Walker. – Norwood: Artech House, 1990. – 245 pp.
 11. Баловнев, В. И. Автомобили и тракторы: [краткий справочник] / В. И. Баловнев, Р. Г. Данилов. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 384 с.
 12. Васильев Б. С. Автомобильный справочник / Б. С. Васильев, М. С. Высоцкий, К. Л. Гаврилов [и др.]; Под ред. Приходько В. М. – М.: ОАО «Издательство «Машиностроение», 2004. – 704 с. (ISBN 5–217–03197–2).
 13. Бовсуновський, А. П. Електротехнічні матеріали: Корот. довідник / А. П. Бовсуновський. – НУХТ. – К.: 2012. – 36 с.
 14. Провод установочный ПВ-1 [Электронный ресурс] // Кабельный завод "Компания ТУМЕН". – Режим доступа: http://www.twomen.odessa.ua/products/cu/ustanovochnie_provoda/pv-1/ - Заголовок с экрана.
- Ключові слова:** індуктивний датчик; контроль, транспортний засіб; залізничний переїзд, безпека руху.
- Ключевые слова:** индуктивный датчик, контроль, транспортное средство, железнодорожный переезд, безопасность движения.
- Keywords:** inductive sensor, control, vehicle, level crossing, traffic safety.
- Рецензенти:**
д.ф.-м.н., проф. В. І. Гаврилюк,
д.т.н., проф. Б. В. Гера.
- Надійшла до редколегії 16.04.2018.
Прийнята до друку 27.04.2018.