

БОЙНИК А. Б., д.т.н., професор,
 ПРИЛИПКО А. А., к.т.н., доцент,
 КАМЕНЄВ О. Ю., к.т.н., доцент,
 ЛАЗАРЄВ О. В., ст. викладач,
 ЩЕБЛИКІНА О. В., аспірант (Український державний університет залізничного транспорту)

Вибір типу чутливого елемента для точкового колійного датчика

Ключовим аспектом при розробленні та виробництві нових точкових датчиків, які б надійно функціонували в умовах експлуатації на залізничному транспорті та були конкурентоспроможними за вартістю, є обґрунтований вибір елементної бази. В основу цього покладено огляд датчиків, призначених для виміру параметрів постійних, змінних та імпульсних електромагнітних полів, характеристик цих датчиків та їх конструкції, якому присвячено викладене в статті дослідження.

Ключові слова: датчики, вимірювальні елементи, транспорт, електромагнітне поле, застосування, характеристики, електромагніт.

Вступ

Як відомо, залізничний транспорт є найважливішою складовою частиною економічної системи України. Через географічне положення країни (перехрестя транспортних коридорів Азія – Європа, Північна Європа, Кавказ та Туреччина) та кліматичні умови (під дією морозів та відлиг автомобільні дороги, як основний конкурент, виходять з ладу взимку) на його частку припадає основна частка вантажних та пасажирських перевезень. Точковий колійний датчик (ТКД) – це первинне джерело інформації, що визначає надійність роботи систем залізничної автоматики, від роботи яких залежить загальний успіх та якість послуг залізниці. Такі найбільш відомі датчики виявлення транспортних засобів, як рейкові кола, фотоелектричні пристрої, шлейфи, не вирішують завдання високої точності позиціонування осі колісної пари, надійного рахунку осей, що необхідно для системи САІРС. Крім цієї системи, ТКД використовуються для підрахунку осей колісних пар рухомого складу, у системах контролю ходових частин, в автоматичній переїзній сигналізації, у системах керування рухом поїздів як на магістральному транспорті, так і на промисловому. Для нашої країни актуальними є розроблення та виробництво нових точкових датчиків, які б надійно функціонували в умовах експлуатації на залізничному транспорті України та були конкурентоспроможними за вартістю.

Мета та завдання дослідження

Провести огляд датчиків, призначених для виміру параметрів постійних, змінних та імпульсних електромагнітних полів. Дослідити характеристики

цих датчиків та їх конструкції. Вибрати тип датчика, найбільш придатного для чутливого елемента ТКД.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Для виміру параметрів постійних, змінних та імпульсних полів розроблена велика кількість датчиків. Найбільш широке застосування одержали датчики Холу, датчики Віганда, ферозонди, SQUID (на основі надпровідного квантового інтерферометра) сенсори, магнітоелектричні датчики, магнітотранзистори, магнітодіоди, магніторезистори, магнітооптичні системи, індукційні котушки, у тому числі системи з декількома індукційними котушками. Такі датчики широко застосовуються як чутливі елементи для виміру параметрів магнітного поля та магнітних властивостей матеріалів, у металошукачах, для виміру електричних сигналів, у вимірювальній техніці. Залежно від величини, яку вимірюють ці пристрої, можливе їх застосування для виміру: магнітної індукції (тесламетри), напруженості магнітного поля (ерстедметри), магнітного потоку (веберметри або флюксметри), коерцитивної сили (коерцитиметри), магнітної проникності (мюметри), магнітної сприйнятливості (капаметри) та ін. Крім того, ці датчики застосовуються при пошуці корисних копалин, в археології, у навігаційних системах, на суші та у повітрі [1– 5, 9, 10].

Одним з нових напрямків у техніці є мікромагнітоелектроніка, що вивчає роботу сучасних перетворювачів магнітного поля, до яких належать магніторезистори, магнітодіоди, магнітотранзистори, магнітиристоры, елементи Холу, а також вироби мікромагнітоелектроніки, створені на їх основі: магніточутливі та керовані магнітами інформаційні системи, магнітні датчики та ін. [2, 3].

© А. Б. Бойник, А. А. Прилипко, О. Ю. Каменєв, О. В. Лазарєв, О. В. Щєбликіна, 2017

Магніторезистивні датчики. Розглянемо деякі види датчиків, які призначені для виміру параметрів магнітних полів.

Принцип дії магніторезистивних датчиків оснований на залежності опору феромагнітних матеріалів від інтенсивності магнітного поля. Залежно від кута між вектором магнітної індукції та напрямком струму відбувається зміна опору датчика. У промисловості застосовуються дуже дешеві та мініатюрні за розміром магніторезистивні датчики. Вони являють собою вимірювальний, резистивний елемент у формі меандру опором від десятків до тисяч омів [2]. Магніторезистивні датчики мають високу чутливість і дають змогу вимірювати незначні зміни магнітного поля від десятків мікрогаусів. Ці датчики застосовуються в магнітометрії, магнітних сканерах, вимірах слабких полів, навігації, компенсації поля Землі, електронних та цифрових компасах, установках неруйнівного контролю та ін. Перевагами магніторезистивних датчиків є широкий діапазон робочих температур ($\pm 100^\circ\text{C}$), відсутність магнітного дрейфу, простота, надійність, довговічність і те, що робота датчиків не залежить від інтенсивності магнітного поля [2, 3].

Анізотропні магніторезистивні датчики (AMR). Докладний опис фізичних принципів деяких датчиків AMR – типу можна знайти в роботі [26]. Недоліками таких датчиків є їх обмежений динамічний діапазон (при насиченні); чутливість до неоднорідності постійного магнітного поля, яка може призвести до сильних порушень характеристик датчика. На характеристики датчика можуть вплинути як зовнішні джерела, так і наведені вихрові струми [24]. Надмагніторезистивні датчики (GMR). Характеристики GMR- датчиків наведені в роботі [27]. Чутливість таких датчиків значною мірою залежить від частоти (для них характерна висока чутливість в області середніх частот, яка помітно зменшується на низьких частотах). До їх недоліків можна віднести обмежений динамічний діапазон та вузькі лінійні характеристики. Вплив магнітного поля приводить до того, що вихідний сигнал не залежить від напрямку поля. Вони нечутливі до магнітних полів, перпендикулярних за напрямком до їх чутливості. Крім цього, характеристики таких датчиків не залежать від величини магнітного поля.

Датчики Холу. Для контролю магнітної індукції найвідомішим та використовуваним пристроєм є датчики Холу. Вимірювальні елементи на основі цих датчиків відзначаються невеликими розмірами та складаються з одного, двох або трьох кристалів напівпровідникового матеріалу. Датчики магнітного поля, що використовують ефект Холу у своїй роботі, є активними, вони самі виробляють вимірювальну напругу, пов'язану з магнітним полем (рис. 1). Датчики Холу широко використовують для вимірів

переміщення та положення. Якщо постійний магніт помістити на мембрані, то датчик Холу можна використовувати як датчик тиску. Перевагами цих датчиків є можливість виміру постійних та змінних магнітних полів, вдале просторове розділення через малі розміри перетворювачів, висока чутливість. Недоліком є вузький діапазон робочих температур та низька стійкість до зовнішніх впливів [1, 3].

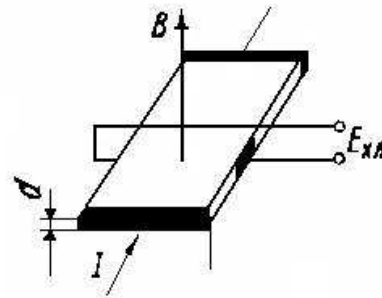


Рис. 1. Датчик Холу

Датчики Віганда. Новітньою розробкою в галузі датчиків магнітного поля є датчики Віганда. Принцип дії цих датчиків оснований на так званому ефекті Віганда. Датчик Віганда являє собою двополюсник, який реагує на магнітні поля та виробляє сигнали до декількох вольтів за умови, що напруженість керуючого магнітного поля перевищує величину напруженості порогу спрацювання (запалювання). Датчик Віганта складається з механічно обробленого дроту з вікалою (малого діаметра), намотаного у вигляді котушки, що має більше тисячі витків (рис. 2). Коли датчик потрапляє в магнітне поле з певною напруженістю, то напрямок намагнічування спонтанно змінюється. У результаті цього виникає імпульс напруги тривалістю до десятків мікросекунд та з амплітудою в декілька вольт [1, 3].

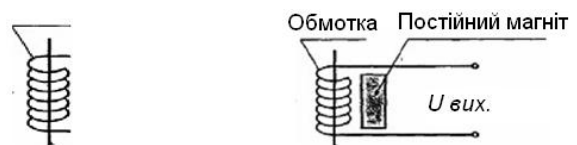


Рис. 2. Конструкція датчика Віганда з обмоткою, а також з обмоткою та постійним магнітом

Перевагами датчиків Віганда є широкий діапазон робочих температур ($\pm 200^\circ\text{C}$), відсутність джерела живлення, іскробезпечність, відсутність коротких замикань, більша величина (декілька вольт) та незалежність сигналу від частоти, з якої змінюється магнітне поле. Галузь застосування цих датчиків сягає від завдань виміру та контролю до систем керування.

Ферозонди. Пристрій призначений для виміру напруженості зовнішніх магнітних полів. Ферозонд являє собою осердя або комплект осердь з магнітом'якого матеріалу з обмотками. Застосовуються для виміру магнітної індукції слабких, постійних та повільно мінливих із частотою не більше сотень герц магнітних полів, для виявлення феромагнітних об'єктів, для виміру магнітної сприйнятливості та магнітного моменту слабоманітних речовин. Завдяки високій чутливості, простоті конструкції, малим габаритам та високій надійності ферозондові перетворювачі широко використовуються як полеміри (визначення наявності магнітного поля і його напруженості), градієнтноміри (градієнт напруженості магнітного поля), портативні тесламетри, а також у магнітній дефектоскопії та при пошуці корисних копалин [2]. Недолік цих датчиків у тому, що ферозонди є відносними індикаторами поля. Вимірювані з їх допомогою значення являють собою результат порівняння напруженості зовнішнього поля з «еталонним».

Електростатичні датчики – ємнісні, основані на ефекті періодичної зміни ємності. Електростатичні, зокрема ємнісні, датчики мають високу чутливість та добротність, малу нелінійність характеристики, малі теплові втрати. Однак широке застосування ємнісних датчиків обмежене великим вихідним опором, необхідністю твердої герметизації, труднощами виключення впливу паразитних ємностей [14]. Електромагнітні датчики, що використовують ефект періодичної зміни індуктивності або взаємоіндуктивності.

Електромагнітні індуктивні датчики. Принцип дії цих датчиків полягає в періодичній зміні індуктивності (коефіцієнта самоіндукції) котушки або взаємоіндуктивності при зміні опору речовини, що перебуває в її магнітному полі. Магнітний опір змінюється або при впливі зовнішніх магнітних полів або при влученні в робочу зону магнітних елементів. Електромагнітні індуктивні датчики поступаються ємнісним за чутливістю та лінійністю характеристики, але перевершують їх за вихідною потужністю, завадостійкістю, надійністю в польових умовах (де можливі коливання температури і вологості навколишнього середовища) [14]. Високочастотні індуктивні датчики використовуються для контролю розмірів електропровідних (як правило, немагнітних) елементів. Частота живлення вибирається досить високою для більшої глибини проникнення електромагнітної хвилі в контрольований об'єкт. При високій частоті властивості матеріалу практично не впливають на точність виміру. Контрольований об'єкт при піднесенні до обмотки або поміщенні всередину останньої витісняє магнітне поле та цим змінює (знижує) індуктивність обмотки [15].

Принцип роботи високочастотного індуктивного датчика оснований на дії вихрових струмів (для матеріалів з високою провідністю) або намагнічування (для магнітних матеріалів). Якщо поблизу обмотки, що живиться змінним струмом, перебуває провідне тіло або магнітний матеріал, то в ньому виникають відповідно вихрові струми або поле намагнічування, що приводить до зміни електричних параметрів обмотки (індуктивність та добротність). Зміна добротності викликана витратою потужності на створення вихрових струмів, а зміна індуктивності – наявністю вторинного магнітного поля, спрямованого вбік ослаблення первинного. Усередині обмотки збудження може перебувати сприймаюча обмотка, настроєна в резонанс частоті генератора. При внесенні матеріалу в робочу зону котушки добротність змінюється та відповідно змінюється напруга на сприймаючій обмотці [15].

Індукційні датчики. Індукційний датчик складається з котушки індуктивності та призначений для виміру змінного магнітного поля. Принцип дії індукційних датчиків оснований на явищі електромагнітної індукції. Напруга, яка індукується на котушці, що поміщена в змінне магнітне поле, пропорційна величині вимірюваної магнітної індукції. Відомі кілька різновидів таких датчиків, наприклад, магнітоіндукційні та індукційноелектромагнітні. У магнітоіндукційних датчиках магнітне поле створюється постійними магнітами. В індукційноелектромагнітних датчиках поле створюється джерелом змінної напруги (струму).

Гальваноманітореккомбінаційні (ГМР) перетворювачі. Гальваноманітореккомбінаційний перетворювач являє собою напівпровідниковий резистор, керований магнітним полем. Робота його основана на використанні магнітоконцентраційного ефекту (у напівпровідниках із провідністю, близькою до власної), який полягає в зміні середньої концентрації носіїв заряду в напівпровіднику при впливі поперечного або поздовжнього магнітного поля. Перевагою ГМР-перетворювачів є висока лінійність у слабких магнітних полях, висока магнітна чутливість. Один з основних недоліків – дуже висока трудомісткість виготовлення.

Виклад основного матеріалу

Для підвищення чутливості та завадостійкості ТКД основним завданням є правильний вибір оптимального первинного перетворювача (датчика, чутливого елемента). Для вирішення цього завдання необхідно провести порівняння відомих пристроїв. Характеристики деяких з них наведені в табл. 1 та 2.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика перетворювачів магнітного поля [3, 13, 16]

Тип перетворювача магнітного поля	Розмір активної частини, мм ²	Магнітна чутливість, В/Тл	Діапазон вимірюваної індукції, мТл	Діапазон робочих частот, Гц	Динамічний діапазон, мТл	Споживана потужність, мВт
Магніторезистивний	0,3-100	1-60	10^{-4} - 10^2	$0-10^9$	300-1000	30-90
Датчики Холу (дискретні)	0,02-50	0,02-5	10^{-4} - 10^3	$0-10^7$	1000	10-50
Ферозонди	1-100	10	10^{-7} -10	$0-10^4$	0,1-1	5-50
Магніточутливий Z-елемент	5-2	500-600	10^{-9} - 10^3	$0-10^5$	10-50	
Магнітоелектричний	25-50	25		$0-10^9$	1000-2000	1-5
ГМР-перетворювач	0,5-2	6-60		н/д	0-80	
Магнітоіндуктивний	10x8x4	1-10	10^{-3} - 10^3	$0,1-10^6$	1-200	

Таблиця 2

Якісне порівняння деяких перетворювачів [2, 13, 16]

Тип перетворювача	Переваги, недоліки, особливості застосування
Магніторезистивний	Тип перетворення: "магнітний потік – опір". Висока магнітна чутливість у сильних магнітних полях. Великий динамічний діапазон та достатня лінійність у сильних магнітних полях. Широкий діапазон робочих температур. Значний струм споживання. Нелінійна характеристика в слабких магнітних полях
Датчик Холу (дискретний)	Тип перетворення: "магнітний потік – ЕРС". Висока чутливість та швидкодія. Великий динамічний діапазон при достатній лінійності вихідної характеристики. Широкий діапазон робочих температур. Значна величина залишкової напруги і її нестабільність
Ферозонд	Тип перетворення: "магнітний потік – індуктивність". Дуже висока питома магнітна чутливість. Порівняно малий струм споживання. Обмежений динамічний діапазон при задовільній лінійності. Обмежений діапазон робочих температур
Магніточутливий Z-елемент	Тип перетворення: "магнітний потік – індуктивність" або "магнітний потік – частота". Дуже висока магнітна чутливість. Порівняно малий струм споживання. Обмежений динамічний діапазон та задовільна лінійність. Обмежений діапазон робочих температур
ГМР-перетворювач	Тип перетворення: "магнітний потік – опір". Висока питома чутливість. Малий струм споживання. Обмежений динамічний діапазон та задовільна лінійність. Обмежений діапазон робочих температур
Магнітоіндуктивні	Тип перетворення: "магнітний потік – індуктивність" або "магнітний потік – частота". Дуже висока магнітна чутливість. Малий струм споживання. Достатній динамічний діапазон при задовільній лінійності. Обмежений діапазон робочих температур

Порівняти результати, отримані різними дослідниками, не можливо через ряд об'єктивних критеріїв. Це пов'язано з високою складністю систем наведених раніше типів датчиків, різними їх конструкціями, різною геометрією та розмірами чутливих елементів, різними системами обробки отриманих сигналів та ін. Проведемо порівняння деяких близьких за конструкцією та застосуванням видів датчиків. Спроби використовувати дуже складні датчики магнітного поля, такі як SQUID та Fluxgate датчики, для реєстрування зміни полів від низькочастотних вихрових струмів (у дефектоскопії) [21–23] дають змогу зробити висновок, що такі системи навряд можна використовувати в польових умовах через складність, велику вартість та недостатню надійність. Високочутливі індуктивні

катушки широко застосовуються в багатьох галузях сучасної промисловості.

Наведемо сферу їх застосування:

- для виміру переміщення металевих тіл щодо датчика в динамічних та статичних умовах (ІП-5К);
- для виявлення металевих включень в ізоляційному матеріалі, що рухається по конвеєру;
- у безконтактних вимикачах;
- для виміру малих амплітуд вібрацій [15];
- в індуктивних датчиках місця розташування;
- у магнітоіндуктивних датчиках наближення та ін.

При порівнянні різних датчиків магнітного поля [28] за завадостійкістю були отримані нижченаведені результати (табл. 3).

Таблиця 3

Порівняння магнітних перетворювачів за завадостійкістю

Типи магнітних перетворювачів	Рівні допустимих «шумів»
На основі SQUID – датчиків	Приблизно $50 \text{ фТ Гц}^{-1/2}$
На основі індукційних котушок	Менше $100 \text{ фТ Гц}^{-1/2}$
Fluxgates	Приблизно $100 \text{ фТ Гц}^{-1/2}$
Магнітометри з оптичною накачкою	Близько $\text{рТГц}^{-1/2}$
На магніторезистивних датчиках	Близько $100 \text{ рТГц}^{-1/2}$
На елементах Холу	На рівні $10 \text{ нТГц}^{-1/2}$

У деяких випадках перспективним є удосконалення існуючих ТКД (рис. 3) [29, 30].

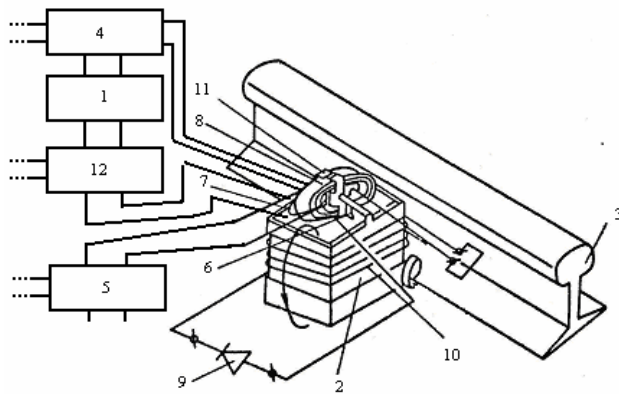


Рис. 3. Функціональна схема підключення первинного перетворювача до реєстратора: 1 – генератор, що задає частоту, 2 – постійний магніт, 3 – рейка, 4 – блок балансування, 5 – диференціальний підсилювач, 6 – обмотка збудження, 7 – секціонована обмотка, 8 – магнітопровід, 9 – діод, 10 – обмотка на постійному магніті, 11 – обмотка балансування, 12 – підсилювач потужності

Первинний перетворювач працює в такий спосіб. Магнітопровід 2 виконує функцію джерела магнітного потоку, а також при проході над його поверхнею колеса колісної пари в його обмотці 10 виникає змінна ЕРС. Позитивна напівхвиля цієї ЕРС за допомогою діода 9 подається на первинну обмотку магнітопроводу 8, під дією якої, а також під дією магнітного потоку, що змінюється, за рахунок входу колісної пари в зону спрацьовування датчика модулюється високочастотний сигнал. Цей сигнал далі обробляє реєстратор.

Фізичні процеси у такому датчику можуть бути описані такою системою диференціальних рівнянь:

$$R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{I\text{II}} \frac{di_2}{dt} + M_{IK} \frac{di_K}{dt} = E, \quad (1)$$

$$R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{II} \frac{di_1}{dt} + M_{IK} \frac{di_K}{dt} = 0, \quad (2)$$

$$R_K i_K + L_K \frac{di_K}{dt} + L_{\text{Др}} \frac{di_K}{dt} + \frac{1}{C} \int i_K dt + M_{KI} \frac{di_1}{dt} + M_{KII} \frac{di_2}{dt} = 0, \quad (3)$$

де R_1, R_2, R_K – відповідно активні опори обмотки на постійному магніті, обмотки балансування та обмотки збудження;

$L_1, L_2, L_K, L_{\text{Др}}$ – відповідно індуктивності обмоток на постійному магніті, балансування та збудження;

i_1, i_2, i_K – відповідно струми в обмотках на постійному магніті, балансування та збудження;

$M_{I\text{II}}, M_{IK}, M_{II}, M_{IK}, M_{KI}, M_{K2}$ – відповідно взаємні індуктивності між відповідними обмотками, нумерація або індексація яких відповідає позначенням їх власних індуктивностей;

E – електрорушійна сила, що наводиться на чутливому елементі ТКД при проходженні повз його зону колеса рухомої одиниці;

C – міжвиткова ємність обмотки збудження.

У свою чергу щодо рівнянь (1) – (3) справедливими будуть такі тотожності:

$$L_{II} = L_2; \quad M_{I\text{II}} = M_{II}; \quad L_I = L_1; \quad M_{KI} = M_{IK} = \sqrt{L_1 L_K};$$

$$M_{KII} = M_{IK} = \sqrt{L_2 L_K}; \quad L_I = L_1 + L_1';$$

$$M_{I\text{II}} = M_{II} = \sqrt{L_1 L_2} - \sqrt{L_1' L_2'}; \quad L_{II} = L_2 - L_2'; \quad M_{KI} = M_{IK} = \sqrt{L_1' L_K};$$

$$M_{KII} = M_{IK} = \sqrt{L_2' L_K}; \quad Z_1 = R_1; \quad Z_2 = R_2,$$

де L_1', L_2' – відповідно додатково-обумовлені значення індуктивностей обмоток на постійному магніті та балансування, пов'язані із взаємною індуктивністю;

Z_1, Z_2 – повні опори відповідно обмоток на постійному магніті та балансування.

Оскільки індуктивність L_K завжди значно менша від індуктивності дроселя, то змінний струм у колі керування досить малий і ним практично можна знехтувати, а режим роботи цього кола вважається близьким до режиму холостого ходу. Ураховуючи це, перепишемо систему рівнянь для схеми в комплексних амплітудах:

$$\underline{I}_1(R_1 + jx_1) + \underline{I}_2 jx_m = \underline{E}, \quad (4)$$

$$\underline{I}_2(R_2 + jx_2) + jx_m \underline{I}_1 = 0, \quad (5)$$

де x_1, x_2, x_m – відповідно реактивні опори обмотки на постійному магніті, обмотки балансування та їх взаємної індуктивності.

Розв'язуючи цю систему рівнянь, отримаємо таку формулу:

$$\underline{U}_{\text{вих}} = \underline{I}_2 R_2 = -E \frac{R_2 (x_m (x_2 R_1 + x_1 R_2) + jx_m R_1 R_2)}{R_1^2 R_2^2 + (x_2 R_1 + x_1 R_2)^2}, \quad (6)$$

$$\tan \varphi = \frac{R_1 R_2}{x_2 R_1 + x_1 R_2}, \quad (7)$$

де $\underline{U}_{\text{вих}}$ – вихідна напруга чутливого елемента ТКД;

φ – фазовий кут між струмом та напругою чутливого елемента ТКД.

Взявши модуль від виразу (6) та виразивши реактивні опори через індуктивності, було отримано таку формулу:

$$U_{\text{вих}} = E \frac{R_2 \sqrt{\omega^2 L_1 L_2 R_1^2 R_2^2 + (\omega^2 \sqrt{L_1 L_2} (L_2 R_1 + L_1 R_2))^2}}{R_1^2 R_2^2 + \omega^2 (L_2 R_1 + L_1 R_2)^2}, \quad (8)$$

де ω – циклічна частота опорного струму живлення елементів ТКД.

Замінивши індуктивності через обмоткові дані та проникність магнітопроводу, було отримано такі вирази:

$$U_{\text{вих}} = E \frac{R_2 \omega K_L W_1 W_2 \mu(I_K)}{\sqrt{R_1^2 R_2^2 + \omega^2 K_L^2 (W_2^2 R_1 + W_1^2 R_2)^2} \mu^2(I_K)}, \quad (9)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{R_1 R_2}{\omega K_L (W_2^2 R_1 + W_1^2 R_2) \mu(I_K)}, \quad (10)$$

де W_1, W_2 – відповідно кількість витків обмоток на постійному магніті та балансування;

K_L – крок обмотки;

$\mu(I_K)$ – магнітна проникність результуючого магнітопроводу обмотки збудження, параметри якого залежать від місця поточної дислокації колеса рухомої одиниці в зоні дії ТКД.

Виконаний за формулами (1) – (10) розрахунок дає змогу визначити вихідні параметри індуктивного ТКД з метою його вибору в конкретних умовах експлуатації.

Висновки

Аналіз наведених пристроїв показав, що сучасні датчики магнітного поля мають ряд недоліків:

- нелінійність у сильних магнітних полях;
- вузький динамічний діапазон;
- необхідність подачі живильної напруги;
- наявність залишкових напруг;
- низька стійкість до статичної електрики та до радіоактивних випромінювань [12].

У цьому ракурсі вигідно вирізняються індуктивні котушки. Використання котушок індуктивності як приймача, що вимірює магнітне поле, дає ряд таких переваг:

- захист від зовнішніх джерел електромагнітних перешкод;
- лінійність (навіть зовнішні фактори, що впливають на датчик, наприклад такі як температура, мають лінійну залежність);

– низький рівень насичуваності при досить великому рівні магнітних полів;

– висока гнучкість у конфігурації датчиків, легка адаптація до наявних електронних перетворювачів сигналу;

– простота роботи та конструкції;

– простота в розрахунках при конструюванні котушок.

Точні розрахунки параметрів датчика (індукційної котушки) можливі завдяки прямій залежності параметрів від величини магнітної індукції в робочій зоні датчика (кількість витків, площа поперечного перерізу можуть бути точно визначені); широкий частотний та динамічний діапазон; через відсутність магнітних елементів у конструкції датчик практично не залежить від вимірюваного магнітного поля (у порівнянні, наприклад, з ферозондовими датчиками) [17–20].

Однак котушки датчиків мають деякі недоліки:

- чутливість тільки до змінних магнітних полів;
- вихідний сигнал залежить від частоти;
- необхідність у підключенні інтегруючих кіл датчика, що вводить додаткові похибки при обробці сигналу;

– низька технологічність виробництва;

– значний час на виготовлення;

– досить висока ціна.

Таким чином, сучасні індуктивні датчики є найбільш прийнятним чутливим елементом для ТКД. Однак в окремих випадках для удосконалення існуючих ТКД потрібно використовувати також високочастотні модулятори з осердям, щоб підвищити швидкість й точність визначення позиції осі колісної пари на залізничній колії.

Використання виведених математичних залежностей дає змогу встановити та підібрати необхідні параметри ТКД для конкретних умов їх експлуатації.

Література

1. Алейников, А. Ф. Датчики (перспективные направления развития) [Текст]: учебное пособие / А. Ф. Алейников; под ред. М. П. Цапенко. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2001. – 176 с.
2. Бараночников, М. Л. Микромагнитоэлектроника [Текст] / М. Л. Бараночников. – М.: ДМК Пресс, 2001. – 554 с.
3. Джексон Р. Г. Новейшие датчики [Текст] / Р. Г. Джексон. – М.: Техносфера, 2007. – 384 с.
4. Ермолов, И. Н. Методы и средства неразрушающего контроля качества [Текст] / И. Н. Ермолов, Ю. Я. Останин. – М.: Высш. шк., 1988. – 368 с.
5. Bichurin M. I Magnetoelectric Sensor of Magnetic Field [Text] / M. I. Bichurin, V. M. Petrov, R. V. Petrov, Y. V. Kiliba, F. I. Bukashev,

- Yu. V. Smirnov, D. N. Eliseev // *Proceedings of The Fourth Conference On Magnetoelectric International Phenomena In Crystals (MEIPIC-4)/Ferroelectrics*, 2002. – Vol. 280. – P. 32 – 35.
6. Бичурин, М. И. Датчики электромагнитного поля [Текст] / М. И. Бичурин, Ю. В. Килиба, Р. В. Петров // VIII Всеросс. науч.-техн. конф.: тез. докл. – Н. Новгород: НГТУ, 1996. – Т. 2. – С. 324.
7. Килиба, Ю. В. Магнитоэлектрические датчики [Текст] / Ю. В. Килиба, Р. В. Петров // XXI Гагаринские чтения: тез. докл. – М.: МГАТУ, 1996. – Ч. 3. – С. 148.
8. Большая Энциклопедия Нефти Газа [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ngpedia.ru> – Дата доступа: 05.03.2017. – Назв. с экрана.
9. Исследование магнитоэлектрических сенсоров на основе пьезокерамики цтс и метгласа [Текст] / М. И. Бичурин, Р. В. Петров, И. Н. Соловьев, А. Н. Соловьев // *Современные проблемы науки и образования*. – 2012. – № 1. – С. 30 – 36.
10. Каперко, А. Ф. Анализ состояния, тенденции развития и новые разработки датчиков преобразователей информации систем измерения, контроля и управления [Текст] / А. Ф. Каперко // *Измерительная техника*. – 1998. – № 1. – С. 3–7.
11. Электромагнитные методы разведки нефти и газа [Текст] // ТИИЭР. – 1989. – № 2. – С. 45.
12. Трошин, А. В. Перспективы применения композиционных магнитоэлектрических структур при разработке современных датчиков [Текст] / А. В. Трошин, С. В. Трошин // *Вестн. СевКавГТУ: СКГТУ*, 2006. – Вып. 2. – С. 20 – 25.
13. Кузнецов, А. О. Выбор датчиков для системы магнитного зрения [Текст] / А. О. Кузнецов // *Научно-технический вестн.* – СПб: СПбГУ. – Вып. 64.
14. Энциклопедия промышленности. Контрольно-измерительные средства [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.kronasm.com/kontrolno-izmeritelnye-sredstva.html – Дата доступа: 07.03.2017. – Назв. с экрана.
15. Высокочастотный индуктивный датчик / Большая Энциклопедия Нефти и Газа. Электронная библиотека «Нефть-Газ» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ngpedia.ru/> – Дата доступа: 11.03.2017. – Назв. с экрана.
16. Иванов, В. Тонкое чутье магнитного поля земли [Текст] / В. Иванов, М. Бабошко, Е. Келпш // БДИ. – 2006. – № 5(68). – С. 10-11.
17. Tumanski, S. Principles of Electrical Measurement [Text] / S. Tumanski // Taylor & Francis, 2006. – 472 p.
18. Tumanski, S. Induction coil sensors - a review [Text] / S. Tumanski // *Measurement // Science & Technology*. – Vol. 18, 2007. – P. R31-R46. Автоматизация виробничих процесів 61.
19. Kunihsa, Tashiro Sensitivity Limits of a Magnetometer with an Air-core Pickup Coil. [Электронный ресурс] / Kunihsa Tashiro, Shin-ichiro Inoue and Hiroyuki Wakiwaka // *Sensors & Transducers 2010 by IFSA*. – Режим доступа: <http://www.sensorsportal.com> – Дата доступа: 2.06.2012. – Назв. с экрана.
20. Lenz, J. Magnetic sensors and their applications [Text] / J. Lenz, A. S. Edelstein // *IEEE Sensors J.* – Vol. 6, No. 3, 2006. – P. 631- 649.
21. Hohmann, R. SQUID-System mit Joule-Thompson-Kuhlung zur Wirbelstromprufung von Flugzeugfelgen [Text] / R. Hohmann // *Dissertationsschrift*. – 1999. Justus-Liebig-Universitdt GieYen.
22. Vertesy, G. Fluxset Sensor Analysis [Text] / Gabor Vertesy, Antal Gasparics // *Journal of Electrical Engineering*. – 2002. – Vol. 53. – P. 23-32. ISSN 1335-3632.
23. Kreutzbruck, M. Wirbelstrompr system mit integriertem Fluxgate-Magnetometer [Text] / M. Kreutzbruck, K. Allweins, C. Heiden // *DACH-Jahrestagung DGZfP, DGfZP, SGZP, Innsbruck*, 29.– 31.5.2000, BB 73.2. – P. 871-881.
24. Hesse, O. Usage of Magnetic Field Sensors for Low Frequency Eddy Current Testing [Text] / O. Hesse, S. Pankratyev // *Measurement science review*. – Vol. 5, Section 3, 2005.
25. Cherepov, S. Optimisation of Low Frequency Eddy Current Sensors Using Improved Inductive Coils and Highly Sensitive AMR and GMR Sensor Modules [Text] / S. Cherepov, O. Hesse, G. Mook, S. Pankratyev, V. Uchanin // *Proceeding of the 13th IMEKO TC-4 International Symposium*. – Vol. 2, 29th Sept. – 1st Oct. 2004, Athens, Greece. Athens: National Technical University of Athens, 2004. – P. 568-576.
26. Philips Semiconductor I²C Handbook. Quick Overview of general purpose I2C Logic Devices [Text] // Philips, 2004. – 15 p.
27. NVE Corporation, GMR Sensors Data Book, April 2003
28. Prance, R J. Room temperature induction magnetometers [Text] / R. J. Prance, T. D. Clark and H. Prance // *Encyclopedia of Sensors*. – Vol. 10ed C A Grimes, E C Dickey and M V Pishko (Valencia, CA American Scientific Publishers) 2006. – P. 1–12.
29. Прилипко А. А. Структурний синтез диференціального точкового колійного датчика [Текст] / А. А. Прилипко // *Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп.* – Харків: УкрДАЗТ, 2008. – Вип. 99. – С. 208-214.
30. Бабаєв М. М. Оптимізація параметрів точкового колійного датчика [Текст] / М. М. Бабаєв, А. А. Прилипко // *Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп.* – Харків: УкрДАЗТ, 2010. – Вип. 113. – С. 62-67.

Бойник А.Б., Прилипко А.А., Каменев А.Ю., Лазарев А.В., Щерблякина Е.В. Выбор типа чувствительного элемента для точечного путевого датчика. Ключевым аспектом при разработке и производстве новых точечных датчиков, которые бы надежно функционировали в условиях эксплуатации на железнодорожном транспорте и были бы конкурентоспособны по цене, является обоснованный выбор элементной базы. В основу этого положен анализ датчиков, предназначенных для измерения параметров постоянных, переменных и импульсных электромагнитных полей, характеристик этих датчиков и их конструкции, которому посвящено изложенное в статье исследование.

Ключевые слова: датчики, измерительные элементы, транспорт, электромагнитное поле, применения, характеристики, электромагнит.

Bojnik A.D., Prilipko A.A., Kameniev A.J., Lasarev A.V., Shchablykina O.V. Selecting the Sensor Type for the Point Sensor. A key aspect in the development and production of new point sensors that would function reliably in a railway operating environment and would be competitive at a price is a sound choice of the element base. This is based on the analysis of sensors designed to measure the parameters of the constants, variables and pulsed electromagnetic fields, the characteristics of these sensors and their design, which is discussed in the article of the research. As a result, the basic characteristics of various types of sensors are established in terms of the possibility of using them as a means of monitoring the freedom of track sections. It was revealed that inductive sensors are the most suitable for use in railway transport. However, in some cases, it is also necessary to use high-frequency modulators with a core to improve existing point-to-point trackers in order to improve the speed and accuracy of determining the wheel pair on the railway track.

Keywords: sensors, measuring elements, transport, electromagnetic field, applications, characteristics, electromagnet.

Надійшла 03.04.2017 р.

Бойнік Анатолій Борисович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: at@kart.edu.ua.

Прилипко Андрій Андрійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: paa_05@mail.ru.

Каменєв Олександр Юрійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: alexstein@meta.ua.

Лазарєв Олексій Владленович, старший викладач кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: lazal@ukr.net.

Щерблякіна Олена Вікторівна, аспірант кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: elenka_12_90@mail.ru.

Bojnik Anatolij Borysovich, Sc.D.(Eng.), professor, Head of department of automatic and computer remote control of train traffic, Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: at@kart.edu.ua.

Prilipko Andriy Andriyovich, Ph.D.(Eng.), associate professor of department of automatic and computer remote control of train traffic, Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: paa_05@mail.ru.

Kameniev Alexandr Jurjevich, Ph.D.(Eng.), associate professor of department of automatic and computer remote control of train traffic, Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: alexstein@meta.ua.

Lazarev Alexij Vladlenovich, senior lecturer of department of automatic and computer remote control of train traffic, Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: lazal@ukr.net.

Shchablykina Olena Viktorivna, graduate of department of automatic and computer remote control of train traffic, Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: elenka_12_90@mail.ru.