

**СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

**Навчально - науковий інститут транспорту і будівництва
Кафедра логістичного управління та безпеки руху на транспорті**

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до кваліфікаційної випускної роботи**

освітній ступінь - магістр
спеціальність - 273 – «Залізничний транспорт»
спеціалізація «Інтероперабельність і безпека на залізничному транспорті»

на тему: «ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ РУХУ ПОЇЗДІВ
УДОСКОНАЛЕННЯМ СИСТЕМ ЗАЛІЗНИЧНОЇ АВТОМАТИКИ»

Виконав
Здобувач вищої освіти
групи ІБЗТ-19зм


(підпис)

Шаріфов В.С.

Керівник:


(підпис)

ст. викл. Мірошникова М.В.

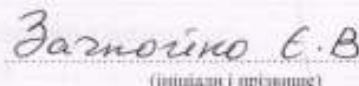
Завідувач кафедри:


(підпис)

проф. Чернецька-Білецька Н.Б.

Рецензент:

(підпис)


(ініціали і прізвище)

Северодонецьк – 2021

1. СТАН І ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ СУЧАСНИХ ПРИБОРІВ РАХУНКУ ВІСЕЙ РУХОМОГО СКЛАДУ

1.1. Особливості застосування пристроїв рахунку вісей рухомого складу в системах залізничної автоматики

Розвиток залізничного транспорту України безпосередньо пов'язане з розвитком автоматизованих систем управління рухом поїздів. Одним із завдань, що вирішуються в процесі функціонування таких систем, є визначення вільності колійних ділянок. Останнім часом для вирішення цього завдання поряд з рейковими ланцюгами все більше в світі використовуються пристрої рахунку осей рухомого складу.

Значний внесок у розвиток теорії і розробку УСО ПС внесли вчені: В.П.Бухгольц, Г.А.Красовській, А.Е.Штанке, Н.А.Іванов, В.І.Шелухін, Г.Г.Валеев, В. І.Самодуров, С.А.Щіголев, І.Г.Тільк, Ю.В.Соболев, М.М.Бабаев, Г.І.Загарій і ін.

Пристрої рахунку осей рухомого складу призначені для виконання наступних функцій [12-14]:

- реєстрації проходження осі рухомого складу над контрольною точкою шляху;
- визначення числа осей, які пройшли над контрольною точкою шляху;
- визначення напрямку руху рухомого складу.

Крім цього, УСО ПС дозволяють вирішувати такі завдання:

- визначення швидкості і прискорення руху рухомого складу;
- визначення типу рухомих одиниць;
- підрахунок числа одиниць рухомого складу;
- контроль вільності залізничного ділянки.

Принцип контролю вільності колійної ділянки заснований на порівнянні кількості осей рухомого складу [12,13,15]. Для цього в рахункових пунктах

СП1 і СП2 (рис. 1.1) підраховується число осей $N1$ і $N2$, які пройшли над кожним кордоном ділянки. Інформація від кожного рахункового пункту передається до вирішального приладу (РП), в якому визначається число осей $\Delta N = N1 - N2$, що знаходяться на ділянці. Якщо число осей на ділянці дорівнює нулю, тобто $\Delta N = 0$, то включається реле вільності КП. Розрізняють системи з централізованим розміщенням апаратури, в яких вирішальний прилад знаходиться на станції, і системи з децентралізованим розміщенням апаратури, в яких вирішальний прилад розташовується в одному з рахункових пунктів.

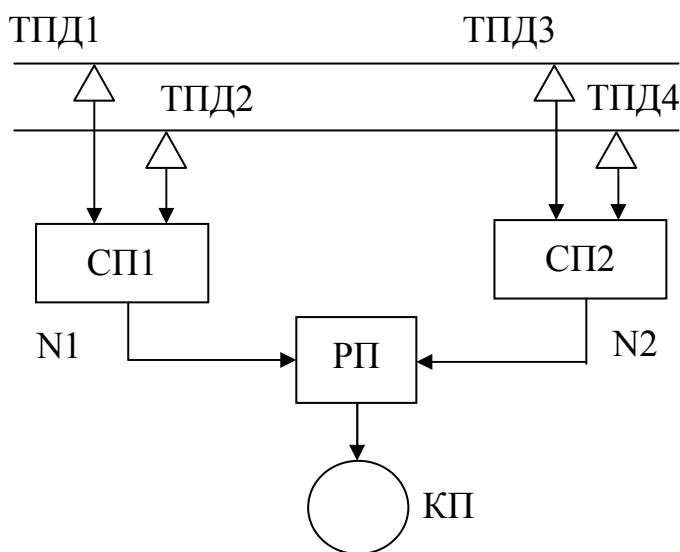


Рис.1.1. Система контролю вільності ділянки методом рахунку вісей

Подібні системи описані в різних публікаціях і випускаються рядом виробників [16-21]. Найбільш відомі системи рахунку осей AzS 350, AzS 600 фірми Siemens (Німеччина) [20,21], AzL 70-30 фірми SEL (Німеччина) [4], а також російські системи УКП СО [6,7,8,17] і ЕССО [9,10]. Такі системи відрізняються застосовуваної елементної базою, числом використовуваних точкових колійних датчиків, видом резервування електронної апаратури, способом передачі даних від рахункових пунктів до вирішального приладу та ін. Так в системі УКП СО на кожному кордоні контрольованої ділянки розташовуються три точкових колійних датчика (ТПД) і коротка рейкове коло [22]. В системі

ЕССО в кожному рахунковому пункті розміщується два ідентичних комплекти апаратури, включаючи ТПД і підлоговий електронний модуль [9].

У разі застосування пристроїв рахунку осей для контролю вільності колійних ділянок до них повинні пред'являтися підвищені вимоги щодо вірогідності одержуваної інформації, так як помилки при підрахунку числа осей можуть привести до реєстрації помилкової вільності колійної ділянки, що порушує безпеку руху поїздів.

На сьогоднішній день перспективним є застосування УСО ПС в системах напівавтоматичного блокування (ПАБ), що дозволяє автоматично контролювати вільність перегону та прибуття поїзда на станцію в повному складі [6]. Завдяки цьому, забезпечується можливість впровадження диспетчерської централізації на ділянках, обладнаних ПАБ з рахунком осей, що дозволяє значно знизити експлуатаційні витрати.

У роботах [23,24] пропонується використовувати пристрої рахунку осей в якості резерву типовий автоблокування. В роботі [23] були проведені розрахунки надійності такого комплексу пристроїв. Було отримано, що застосування пристроїв рахунку осей в якості резерву типовий автоблокування дозволяє збільшити середній час напрацювання на відмову в умовах зниженого опору ізоляції баласту більш ніж в 2 рази, а ймовірність безвідмовної роботи протягом року - в 1,3 рази.

У роботах [25-27] описані системи автоблокування на основі пристроїв рахунку осей. В роботі [3] обґрунтовується доцільність застосування УСО ПС для контролю вільності довгих перегонів (понад 10 км). В роботі [28] розглядаються переваги автоблокування з рахунком осей (АБ СО) в порівнянні з традиційною автоблокуванням: функціональна гнучкість і більш висока економічна ефективність. Завдяки можливості оперативного зміни числа блокувальних ділянок на перегоні, в системі АБ СО може бути реалізована пряма залежність між експлуатаційними витратами і розмірами руху поїздів.

В даний час на залізницях України УСО ПС в основному використовуються в системах горочної автоматичної централізації (ГАЦ) і системах вияв-

лення несправностей ходових частин поїзда (ДИСК та ПОНАБ). У ГАЦ пристрої рахунку осей застосовуються для контролю зайнятості стрілочних ділянок, підрахунку числа осей, візків, фізичних вагонів, вимірювання швидкості і прискорення руху відчепів [13,29,30]. У системах ДИСК та ПОНАБ [31], УСО ПС використовуються для подачі пускових сигналів попереднього включення і виключення апаратури при підході і видаленні поїзда, визначення напрямку руху поїзда, а також для рахунку фізичних вагонів у складі контрольованого поїзда.

УСО ПС можуть також застосовуватися в системах автоматичної переїзної сигналізації (АПС) для подачі пускових команд в виконавчі схеми на закриття і відкриття переїзду при підході або видаленні поїзда, подачі старт-стопного сигналів в пристрої вимірювання часу (швидкості) наближення поїзда до переїзду [13, 14]. Пристрої рахунку осей дозволяють отримати функціональну залежність моментів часу закриття шлагбаума і включення переїзної сигналізації від швидкості руху поїзда.

У системах ідентифікації рухомих одиниць УСО ПС активізують апаратуру зчитування номерів вагонів при наближенні поїзда, дозволяють встановлювати напрямок руху, визначати порядок обробки лічених сигналів, фіксують проходження кожного вагона і «прив'язують» лічені номери до конкретних вагонів [32].

Пристрої рахунку осей можуть застосовуватися також для отримання додаткових даних про швидкість, прискорення і умовної довжині рухомого складу з общеінформативної метою [14]. Ці дані можуть використовуватися для сповіщення працівників служб колії, енергопостачання, СЦБ, зв'язку і т.п. про наближення поїзда при роботі на коліях станцій або перегонів. Це дозволить підвищити безпеку роботи і скоротити час простою. Отримання інформації про швидкість дозволяє черговому по станції або поїзного диспетчера контролювати дії машиніста під час руху поїзда, даючи йому, при необхідності, відповідні вказівки.

Таким чином, пристрої рахунку осей рухомого складу можуть застосовуватися в системах залізничної автоматики для вирішення різних завдань. При використанні таких пристроїв для контролю вільності колійних ділянок від достовірності рахунку осей залежить безпека руху поїздів. Отримана за допомогою УСО ПС інформація про швидкість, прискорення руху поїзда, типі рухомих одиниць, кількості вагонів у складі дозволяє підвищити ефективність роботи АСУЖТ. У той же час на Україні УСО ПС знайшли обмежене застосування, що пов'язано з недостатньою достовірністю інформації, отриманої за допомогою вітчизняних пристроїв рахунку осей.

1.2. Особливості побудови існуючих пристроїв рахунку вісей рухомого складу

До теперішнього часу розроблені і випускаються декількома виробниками різні пристрої рахунку осей рухомого складу, що відрізняються використаними схемними рішеннями, елементної базою, числом і розташуванням точкових колійних датчиків (ТПД), алгоритмами обробки сигналів від ТПД і рядом інших особливостей [33-37].

Одним з провідних виробників подібних пристроїв є фірма Siemens (Німеччина). Структура лічильника осей ZP43E, розробленого фірмою Siemens, представлена на рис.1.2 [37]. До складу лічильника входять двоканальний датчик SG, вхідні підсилювачі EV1, EV2, вузькосмугові фільтри EF1, EF2, підсилювачі V1, V2, випрямлячі GR1, GR2, перетворювачі «напруга-частота» SFU1, SFU2, широкосмугові фільтри AF1, AF2. Датчик складається з двох передавальних S1, S2 і двох прийомних котушок E1, E2, розташованих по різні боки рейки SN. Генератор G збуджує в передавальних котушках електромагнітні коливання. Магнітне поле передавальних котушок в обхід рейки SN досягає прийомних котушок і індукує в них е.р.с. Електричні сигнали від котушок E1, E2 по кабелю VK надходять на вхідні підсилювачі EV1, EV2, розміщені в сполучному блоці AG.

Перетворювачі SFU1, SFU2 виробляють прямокутні імпульси, частота проходження яких (f_1 і f_2) визначається величиною постійної вхідної напруги. Отримані імпульси через фільтри AF1, AF2 і розв'язує ланка ЕК по двоканальному лінійному кабелю надходять до системи централізації. Напруга живлення подається від акумуляторної батареї на посаді централізації через розв'язують ланка ЕК на стабілізатор SR.

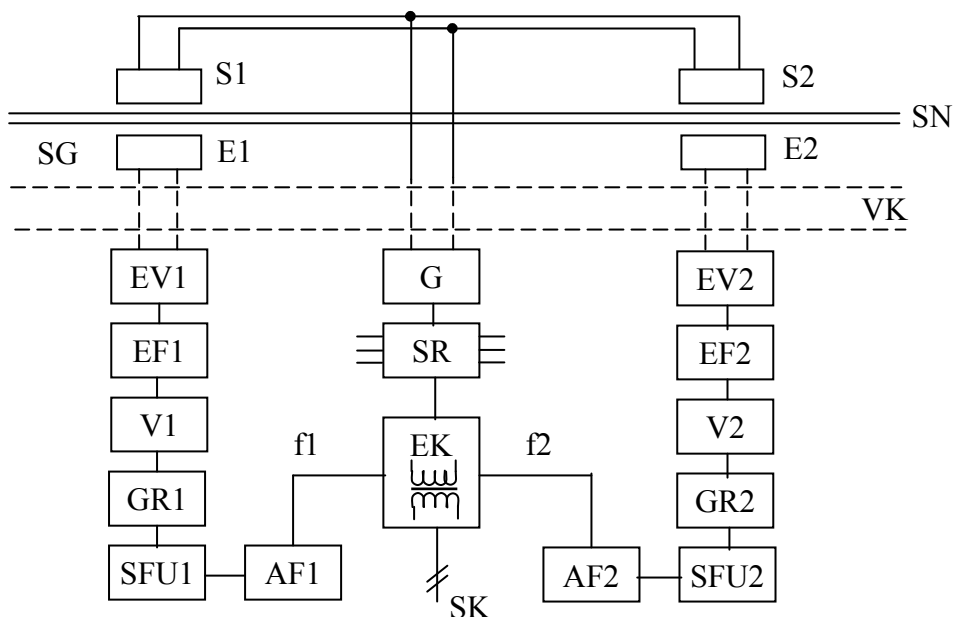


Рис.1.2. Структура лічильника вісей ZP 43 E

Слідуючи через зону дії датчика, колесо рухомого складу змінює коефіцієнт зв'язку між передавальними і приймальними котушками, в результаті чого збільшується індукціруемая в прийомних котушках е.р.с. Це призводить до зміни частоти імпульсів на виході перетворювачів SFU1, SFU2 і, як наслідок, до зміни рівня сигналу на виході фільтрів AF1, AF2 і в лінії. Залежно від напрямку руху спочатку зменшується сигнал на одній частоті, а потім - на іншій. Зміна рівня сигналу в лінії фіксується рахунковим пристроєм, розташованим на посаді централізації. При цьому черговість зміни рівня сигналу на частотах f_1 , f_2 дозволяє визначати напрямок руху і виконувати операції підсумовування або віднімання числа осей в лічильнику.

Недоліком даного пристрою є необхідність передачі кожного рахункового імпульсу на пост централізації. Це накладає обмеження на довжину лінії зв'язку від лічильника осей до поста централізації, обумовлене вимогами помехозащищенности переданих сигналів.

У ряді УСО ПС рахункові пристрій розташовується в шляховому ящику в безпосередній близькості від ТПД. При цьому на пост централізації за допомогою пристрою прийому-передачі передається інформація про кількість які пройшли осей і приймаються керуючі сигнали. Так в системі рахунку осей AzS 600 фірми Siemens рахункові пункти обладнані стандартними інтерфейсами, виконаними за рекомендацією V.24 / V.28 МККТТ, до яких можуть бути підключені такі пристрої передачі, як модеми з дво- або чотирипровідними лініями, системи радіо- або волоконно оптичної зв'язку [3]. В системі рахунку осей SOL-1 фірми Adtranz для організації обміну даними використовується стандартний протокол CAN.

Одним із завдань, що вирішуються в УСО ПС, є виявлення сигналу проходу осі рухомого складу, що надходить від ТПД на тлі перешкод. У лічильнику ZP43E (рис.1.2) для звільнення сигналу від перешкод використовуються вузькосмугові фільтри. В [38] розглядається питання виявлення сигналу проходу осі від односекційного ТПД на тлі білого гауссовського шуму. Отримано структурна схема оптимального детектора. Запропоновано також адаптивний обнаружитель, що містить адаптивний узгоджений фільтр. Пристрій доповнено вимірником відносини сигнал / шум, необхідним для встановлення оптимального порогу виявлення і пристроєм підстроювання параметрів фільтра. Керуючі сигнали для підстроювання параметрів фільтра формуються відповідно до вихідними сигналами датчика швидкості.

Роботи [39-41] присвячені виявленню осі рухомого складу за сигналами від двох незалежних ТПД. Синтезовані схеми оптимального і субоптимального обнаружителей, розглянуті питання комплексування обнаружителя по входах і виходах. До складу синтезованих обнаружителей входять блоки обчислення математичних виразів, при реалізації яких можуть виникнути труднощі.

На роботу УСО ПС крім флуктуаційних перешкод, які добре описуються моделлю білого гауссовського шуму, впливають імпульсні і зосереджені по спектру перешкоди. Одним з рішень щодо зменшення впливу імпульсних перешкод є селекція надходять від ТПД до приймача імпульсів по тривалості [42]. Якщо тривалість надійшов імпульсу менше мінімально допустимої, то даний імпульс вважається перешкодою і ігнорується при підрахунку числа осей. Однак даний метод не дозволяє зменшити вплив імпульсних перешкод великої тривалості.

В роботі [43] для підвищення завадостійкості пропонується аналоговий сигнал від ТПД перетворювати в цифровий і виробляти цифрову фільтрацію, кореляційний аналіз та ідентифікацію сигналу проходу осі рухомого складу.

У роботах [33,44,45] розглядаються різні варіанти УСО ПС, в яких використовується логічна обробка сигналів від ТПД. Так в пристрої [33] для підвищення точності відліку осей міститься блок логічного аналізу, що складається з одинібратора, трьох елементів «І» і елемента «АБО». Пристрій, описане в роботі [44], для підвищення точності і надійності роботи забезпечено формувачем імпульсів, генератором опорної частоти, блоком виділення негативного і позитивного фронтів. У даних пристроях для обробки сигналів від датчиків використовуються дискретні логічні елементи. У той же час застосування сучасних мікропроцесорних засобів дозволяє значно підвищити достовірність одержуваної інформації.

У пристрої [35] використовується принцип розпізнавання колісних пар. Пристрій містить два датчика, встановлених на різних рейках на якійсь відстані один від одного. У мікропроцесорном блоці порівнюються відстані між сусідніми осями в поїзді. Це зменшує число помилкових спрацьовувань пристрою, наприклад, від магнітного впливу маси звішувати вантажу, електромагнітного гальма і ін. В роботі [46] запропонований спосіб автоматичного коректування результатів числа осей.

Для забезпечення вимоги функціональної надійності в [47] пропонується використовувати схеми чутливих елементів, що генерують спеціальний сигнал

при відмові чутливого елемента або джерела електроживлення. Одна з таких схем містить високочастотний трансформатор, первинна та вторинна обмотки якого розташовані по різні боки рейки. Первинна обмотка підключена до високочастотного генератора, а вторинна - до приймача сигналу. При наявності колеса в зоні дії чутливого елемента через його екрануючого дії напруга, наводиме у вторинній обмотці, зменшується. При будь-якому відмову генератора, трансформатора або сполучних проводів на вхід приймача надходить нульовий сигнал.

До теперішнього часу розроблені різні алгоритми для визначення за сигналами від ТПД типу вагонів і підрахунку числа які пройшли фізичних одиниць [44,48,49]. Так відповідно до алгоритму [48] вимірюється час проходження осей над одним датчиком, потім обчислюються межосних відстані, порівнюються ці значення з табличними і розпізнається тип вагона.

Таким чином, незважаючи на значну кількість розроблених і випущених пристроїв рахунку осей, необхідно проводити подальші дослідження щодо підвищення завадостійкості та надійності УСО ПС, розробці алгоритмів роботи, які дозволять використовувати можливості сучасних мікропроцесорних засобів, розробці методів діагностики працездатності пристроїв.

1.3. Типи і конструкції існуючих точкових колійних датчиків

Точкові колійні датчики (ТКД) є одними з основних елементів УСО ПС. Такі датчики дозволяють реєструвати проходження кожної осі рухомого складу контрольної точки шляху.

Існуючі ТКД можна класифікувати за різними ознаками (рис.1.3): енергетичного режиму, схемного принципу роботи, засобам конструктивного компонування, фізичним принципам роботи [12,13,38,50].

За енергетичним режиму роботи первинних перетворювачів датчики поділяються на параметричні та генераторні. У параметричних датчиках зміна вхідного впливу викликає зміну параметрів електричної або магнітної ланцюга

первинного перетворювача, а в генераторних датчиках - до виникнення е.р.с. в перетворювачі.

За схемного принципом датчики діляться на одноканальні, двоканальні і мостові з первинними перетворювачами параметричного типу. У одноканальних датчиках проходження колеса фіксується методом безпосередньої оцінки вхідного впливу на перетворювач датчика, а в двоканальних (диференціальних) - методом порівняння сигналів від двох самостійних перетворювачів. У мостових датчиках перетворювач параметричного типу включається в одне з плечей вимірювального моста. За розбалансу моста фіксується факт проходження колеса.

Одноканальні датчики мають більш просту конструкцію в порівнянні з диференціальними. У той же час диференціальні забезпечують кращу чутливість і стійкість. До недоліків мостових датчиків слід віднести труднощі балансування моста, а також їх невисоку стабільність.

За способом конструктивної компоновки датчики поділяють на одинарні (з об'єднанням всіх елементів в одному блоці) і багатокомплектного (з рознесенням елементів, які обумовлюють як вимогами підвищення надійності, так і принципом дії). Так, наприклад, у датчиків, заснованих на екранування колеса енергії випромінювання: електромагнітних, оптичних, первинні перетворювачі розташовуються по різні боки рейки.

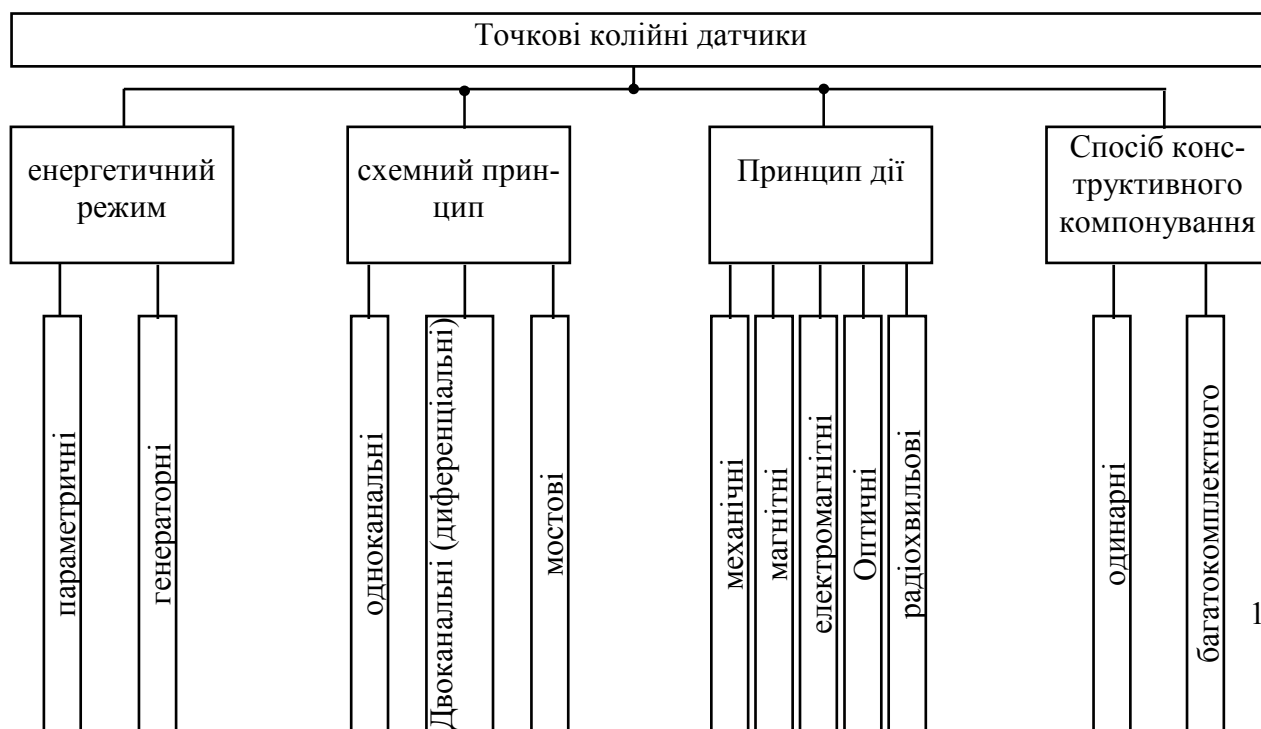


Рис.1.3. Класифікація точкових колійних датчиків

У деяких системах, що використовують ТПД, потрібно не тільки виявлення колеса в зоні дії датчика, але і визначення напрямку його руху. Для цього використовується реверсивний комплект ТПД [51], який містить два або три ТПД і аналізатор напрямку руху. Останній являє собою цифровий кінцевий автомат, що має входи сигналів від ТПД і виходи сигналів парного і непарного напрямку руху. Датчики реверсивного комплекту можуть бути об'єднані в одному корпусі, утворюючи багатосекційний датчик.

За фізичним принципом роботи ТПД діляться на механоконтактні, магнітні, електромагнітні, оптичні та радіохвильові.

У механоконтактних ТПД первинний перетворювач реагує на механічні впливи, що виникають при проходженні рухомого складу. Залежно від виду механічної дії ці датчики можна поділити на натискні, деформаційні і вібраційні. Найбільшого поширення серед механічних датчиків отримали деформаційні датчики. Так в системі ПАБ застосовується педаль ПСП-2 [12], що представляє собою деформаційний датчик, що реагує на просідання рейки. Недоліками механічних датчиків є змінюється достовірність їх роботи, що залежить від динаміки впливу рухомого складу на датчик, швидкості проходження, осьового навантаження, ударних і вібраційних прискорень, а також недостатня швидкодія механізму.

У магнітних ТПД феромагнітна маса колеса змінює магнітне поле датчика, що фіксується первинним перетворювачем. За типом первинного перетворювача магнітні ТПД діляться на магнітоконтактні, магніторезистивні, датчики Холла і індукційні. У Магнітоконтактні ТПД проходження колеса в зоні чутливості датчика призводить до зміни магнітного потоку, що пронизує магнітну систему контактно-релейної вставки, в результаті чого спрацьовує ос-

тання [52-54]. У магніторезистивних датчиках зміна магнітного потоку під впливом феромагнітної маси колеса призводить до зміни опору первинного перетворювача, а в датчиках Холла - до зміни е.р.с. на виході первинного перетворювача [13, 55].

З усіх типів магнітних ТПД на залізницях України найбільшого поширення набули індукційні датчики. Такі датчики містять магніт з насадженої на нього котушкою [56-58]. При переміщенні колеса рухомого складу над датчиком, внаслідок зміни магнітного потоку, що пронизує котушку датчика, в ній індукується біполярний імпульс, амплітуда якого пропорційна швидкості руху колеса. До індукційним ТПД відносяться датчики ПБМ-56 і ДМ-88 [56]. Недоліками індукційних ТПД є непрацездатність при малих швидкостях руху рухомого складу, поява помилкових сигналів на виході датчика внаслідок мікрофонного ефекту. Крім цього, спільними недоліками магнітних ТПД є чутливість до впливу зовнішніх магнітних полів, сторонніх металевих предметів, що володіють магнітними властивостями.

Дія оптичних ТПД засноване на перериванні або модуляції їх випромінювань колесами рухомого складу [59, 60]. До оптичних ТПД відноситься фотоелектричний пристрій (ФЕУ), що включає світловипромінювач (освітлювач) і фотоприймач [59]. ФЕУ широко експлуатується як засіб додаткового захисту стрілки від перекладу під вагонами на сортувальних станціях.

Перевагою оптичних датчиків є простота реалізації і експлуатації, відносно низька вартість. Однак їх робота сильно залежить від стану атмосфери (дощ, туман, сніг, пил). Запиленість і забрудненість оптичних лінз датчиків сильно відбивається на нормальному функціонуванні останніх. З іншого боку, в сонячну погоду при проїзді в контрольованій зоні вагонів з добре відображають бічними поверхнями, наприклад рефрижераторних секцій, в приймач ФЕУ потрапляють відображення у вигляді сонячних зайчиків, в результаті чого виробляється команда помилкової вільності.

Дія радіохвильових ТПД засноване на перериванні колесами рухомого складу потоку СВЧ-енергії або відображенні такого потоку від коліс [61-63]. На цьому принципі заснована дія датчика РТД-С, який застосовується для контролю вільності стрілочних ділянок на сортувальних станціях [61]. При використанні радіохвильових датчиків помилки виявлення транспортних одиниць можуть виникати внаслідок відображення або екранування випромінюваного датчиком сигналу близько розташованими місцевими предметами, елементами верхньої будови колії. В цілому такі датчики забезпечують хороші характеристики, однак, мають складну конструкцію, вимагають точного налаштування і кваліфікованого обслуговування.

Дія електромагнітних ТПД засноване на зміні металевої масою колеса електромагнітного поля датчика. При цьому факт проходження колеса фіксується або по зміні повного опору котушок датчика, або зі зміни наводяться в них е.р.с [50]. Електромагнітні датчики забезпечують хороші характеристики і мають порівняно просту конструкцію. Вони зберігають працездатність в широкому діапазоні швидкостей руху рухомого складу, в різноманітних кліматичних умовах, при наявності сильних магнітних полів тягового струму і полів тягових двигунів локомотивів.

Існуючі і розробляються електромагнітні ТПД можна розділити по типу первинного перетворювача на трансформаторні і параметричні. У трансформаторних ТПД містяться передає котушка індуктивності і одна або декілька приймальних котушок. Зміна колесом електромагнітного поля передавальної котушки призводить до зміни наводяться в прийомних котушках ЕРС, що фіксується реєструючим пристроєм.

Існуючі трансформаторні ТПД відрізняються один від одного конфігурацією і взаємним розташуванням передавальних і прийомних котушок. Як правило, для підвищення чутливості застосовують таке розташування і включення котушок, при якому в відсутності колеса на виході датчика присутній сигнал близький до нуля. Так відома трансформаторно-компенсаційна педаль ТКП [64] містить S-подібний магнітопровід, на якому

розташовані передає котушка і дві прийомних котушки (сигнальна і компенсаційна), включені з диференціальної схемою. Магнітний потік, створюваний передавальною котушкою розподіляється на сигнальний і компенсаційний магнітні потоки, які, будучи частково зчепленими з прийомними котушками індукують в них ЕРС. Датчик налаштовується таким чином, щоб в початковому стані (у відсутності колеса) сигнальна і компенсаційна ЕРС дорівнювали один одному. Внаслідок цього сигнал на виході датчика дорівнює нулю. Поява феромагнітної маси колеса між рейкою і магнітопроводом датчика викликає збільшення сигнального магнітного потоку і зменшення компенсаційного потоку, що порушує рівність індукованих в прийомних котушках ЕРС. На виході датчика з'являється сигнал проходу осі.

2. ДОСЛІДЖЕННЯ І ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ПАРАМЕТРІВ ТОЧКОВИХ КОЛІЙНИХ ДАТЧИКІВ З ВИКОРИСТАННЯМ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

2.1. Структура пристрою рахунку віей і конструкція точкового колійного датчика

На підставі проведеного аналізу існуючих УСО ПС, а також особливостей їх експлуатації і пред'явлених до них вимог запропонована структура пристрою рахунку осей (рис.2.1). До складу пристрою входять: точкові шляхові датчики, приймач сигналів від ТПД, блок логічної обробки, блок тестування працездатності і блок приймально-передачі. Колійні датчики кріпляться до рейки, а електронні блоки розміщуються на відстані до 10 м від датчика. Електричні сигнали від ТПД по кабелю зв'язку надходять на вхід приймача, в якому проводиться їх фільтрація, посилення і нормування. У блоці логічної обробки реєструється проїзд осі

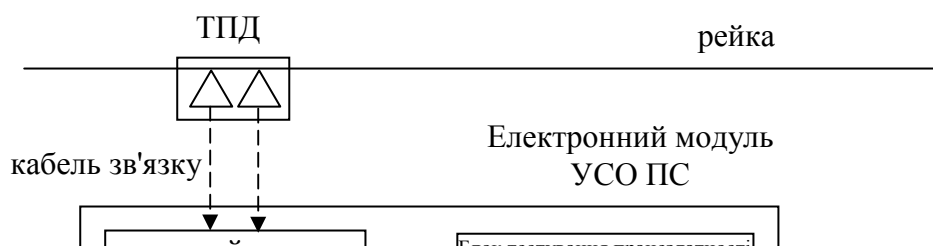


Рис.2.1. Структура пристрою рахунку вісей рухомого складу

рухомого складу, визначається напрямком руху та підраховується кількість які пройшли осей. За допомогою блоку приймально-передачі проводиться передача інформації про кількість осей і прийом сигналів управління. Блок тестування застосовується для перевірки працездатності пристрою.

При виборі конструкції ТПД необхідно враховувати пред'являються до датчикам вимоги:

- висока перешкодозахищеність;
- висока чутливість;
- стабільність роботи;
- простота конструкції;
- простота установки і обслуговування.

Зазначеним вимогам відповідає трансформаторний диференційний датчик з повітряними котушками. Такий датчик містить передавальну і дві прийомні котушки, розташовані в горизонтальній площині (рис. 2.2). Передає котушка підключається до генератора синусоїдальних коливань, а прийомні, з яких знімається вихідна напруга датчика, з'єднані з приймачем сигналів від ТПД. Завдяки диференціального включення

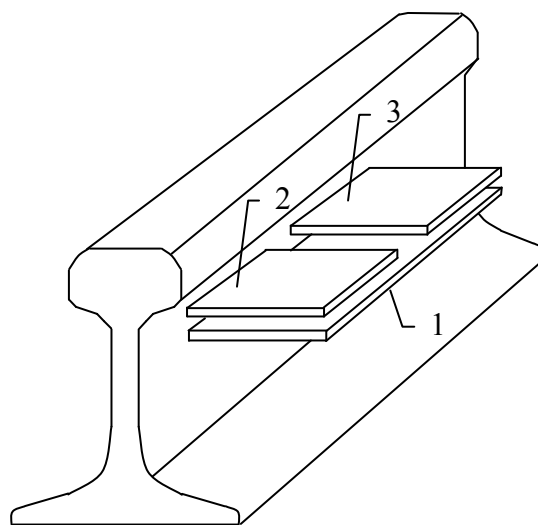


Рис. 2.2. Розташування котушок трансформаторного диференційного датчика:

1 - передає котушка; 2,3 - прийомні

приймальних котушок забезпечуються висока перешкодозахищеність і чутливість датчика. Відсутність феромагнітного сердечника забезпечує температурну стабільність і дозволяє використовувати високу робочу частоту, завдяки чому підвищується максимальна контрольована швидкість проїзду колісної пари. Розташування елементів датчика в одному корпусі спрощує його установку і обслуговування. Крім цього, використання двох прийомних котушок дозволяє визначати напрямок руху кожної колісної пари по сигналу від одного датчика.

2.2. Аналіз роботи трансформаторного точкового колійного датчика

Дослідження впливу конструкційних і електричних параметрів ТПД, а також стану коліс рухомого складу (типу, ступеня зносу і наявності дефектів) на вихідний сигнал ТПД є багатофакторним завданням, що вимагає великих тимчасових і матеріальних витрат. До того ж деякі з перерахованих досліджень є важко реалізованими експериментально. Відповідно до вищевикладеного велика частина досліджень даного розділу виконана на математичній моделі.

Схема включення трансформаторного диференційного ТПД наведені на рис. 2.3. Приймальні котушки 2, 3 мають однакові конструкційні параметри, однакову індуктивність і розташовані симетрично по відношенню до передавальної котушки 1. Передавальна котушка підключена до виходу генератора синусоїдальних коливань, а диференційно включені прийомні котушки - до входу приймального пристрою (ПУ). За відсутності колеса в прийомних котушках наводяться однакові е.р.с. [92]

$$\dot{E}_{2i}^0 = j\omega k_{св}^0 \sqrt{L_1 L_{2i}} \dot{I}_1 ,$$

де j - уявна одиниця,

$\omega = 2\pi f$, F - робоча частота датчика,

$k_{св}^0$ - коефіцієнт магнітного зв'язку кожної приймальної котушки з передавальної за відсутності колеса,

L_1, L_{2i} - індуктивності котушок, $i = 1, 2$,

I_1 - ток в передавальній котушці.

Позаяк приймальні котушки включені диференційно, то вихідний сигнал датчика під час відсутності колеса дорівнює нулю

$$\dot{U}_c^0 = \dot{E}_{21}^0 - \dot{E}_{22}^0 = 0.$$

При появі колеса в зоні чутливості датчика ЕРС в прийомних котушках дорівнюватимуть

$$\dot{E}_{21} = j\omega(k_{cb}^0 + \Delta k_{cb1})\sqrt{(L_1 + \Delta L_1)(L_{21} + \Delta L_{21})}\dot{I}_1, \quad (2.1)$$

$$\dot{E}_{22} = j\omega(k_{cb}^0 + \Delta k_{cb2})\sqrt{(L_1 + \Delta L_1)(L_{22} + \Delta L_{22})}\dot{I}_1, \quad (2.2)$$

де $\Delta k_{cb1}, \Delta k_{cb2}$ - зміни коефіцієнтів зв'язку між котушками,

а $\Delta L_1, \Delta L_{21}, \Delta L_{22}$ - зміни індуктивності котушок внаслідок появи колеса.

Так як величини $\Delta L_1, \Delta L_{21}, \Delta L_{22}$ значно менше, ніж L_1, L_{21}, L_{22} , то в подальшому не будемо їх враховувати.

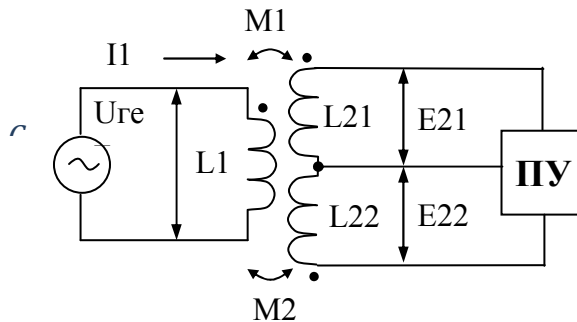


Рис.2.3. Схема включення трансформаторного диференційного ТПД

Уявімо індуктивність котушок у вигляді

$$L_1 = k_{L1} W_1^2, \quad (2.3)$$

$$L_{21} = L_{22} = k_{L2} W_2^2, \quad (2.4)$$

де k_{L1} , k_{L2} - коефіцієнти, що залежать від розмірів котушок

W_1 , W_2 - число витків в передавальній і приймальній котушках. Визначивши різницю е.р.с. (2.1), (2.2), вважаючи навантаження датчика високоомній, отримаємо вираз для його вихідного сигналу

$$\dot{U}_c = j\omega(\Delta k_{cb1} - \Delta k_{cb2})W_1W_2\sqrt{k_{L1}k_{L2}}\dot{I}_1. \quad (2.5)$$

З огляду на конструктивні особливості трансформаторного ТПД (рис.2.2), можна вважати, що перебування колеса над приймальною котушкою 2 не змінює коефіцієнт зв'язку котушок 3 і 1, тобто при цьому $\Delta k_{cb2} = 0$, А при знаходженні колеса над котушкою 3 - $\Delta k_{cb1} = 0$. Тому при проходженні колеса на виході ТПД послідовно формуються два електричних сигналу протилежної полярності

$$\dot{U}_c = \pm j\omega\Delta k_{cb}W_1W_2\sqrt{k_{L1}k_{L2}}\dot{I}_1, \quad (2.6)$$

де Δk_{cb} - зміна коефіцієнта зв'язку між передавальною і однією з прийомних котушок внаслідок появи колеса над цією котушкою.

З (2.6) видно, що вихідний сигнал датчика залежить від робочої частоти, сили тока в передавальній котушці, числа витків в котушках, розмірів котушок а також величини Δk_{cb} . величина Δk_{cb} , В свою чергу, залежить від розмірів і взаємного положення котушок ТПД, їх положення по відношенню до рейки, робочої частоти, а також відстані між гребенем привід і поверхнею ТПД.

2.3. Математична модель трансформаторного точкового колійного датчика

Отримаємо вираз для напруженості магнітного поля датчика в вільному просторі. Навантаження датчика зазвичай є високоомним. Внаслідок цього в прийомних котушках протікає незначний струм і можна вважати, що магнітне поле створюється тільки передавальною котушкою датчика. Так як розміри системи «датчик-рельс-колесо» набагато менше довжини хвилі випромінюваних

датчиком електромагнітних коливань, то поле датчика можна вважати квазістаціонарним. Тому для визначення напруженості магнітного поля датчика можна використовувати закон Біо-Савара [93].

Напруженість магнітного поля одного витка передавальної котушки в точці $\vec{M}(\vec{r})$ (Рис.2.4) відповідно до закону Біо-Савара визначається виразом

$$\vec{H}(\vec{r}) = \frac{I}{4\pi} \int_L \frac{[\vec{dl}', \vec{r}_0]}{|\vec{r} - \vec{r}'|^2}, \quad (2.7)$$

де I - сила струму, що протікає в витку;

L - контур витка, по якому проводиться інтегрування;

\vec{dl}' - одиничний вектор, напрям якого збігається з напрямком протікання струму;

$$\vec{r}_0 = \frac{(\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|}.$$

Використовую вираз (2.7), визначимо напруженість магнітного поля, що створюється відрізком витка АВ (рис.2.4)

$$\vec{H}_{AB}(x, y, z) = \frac{I}{4\pi} \left(\vec{i} \cdot z - \vec{k} \cdot (x - a) \right) \int_{-b}^b \frac{dy'}{\sqrt{[(x - a)^2 + (y - y')^2 + z^2]^3}},$$

де \vec{i} , \vec{k} - одиничні вектори, направлені уздовж осей x , z відповідно;

a і b - половина довжини і ширини витка, відповідно.

Провівши інтегрування, отримаємо

$$\vec{H}_{AB}(x, y, z) = \frac{I}{4\pi} \frac{\vec{k} \cdot (x-a) - \vec{i} \cdot z}{(x-a)^2 + z^2} \left[\frac{y-b}{\sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2 + z^2}} - \frac{y+b}{\sqrt{(x-a)^2 + (y+b)^2 + z^2}} \right]$$

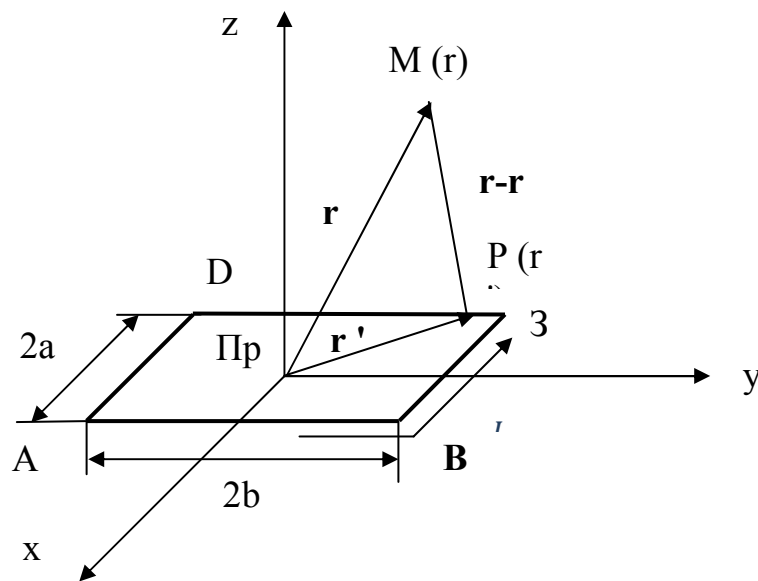


Рис.2.4. Один виток передавальної котушки ТПД

Аналогічні вирази виходять для напруженості магнітного поля, що створюється іншими відрізками витка. Провівши векторне підсумовування напруженості \vec{H}_{AB} , \vec{H}_{BC} , \vec{H}_{CD} і \vec{H}_{DA} , Отримаємо вирази для складових напруженості магнітного поля, створюваного витком передавальної котушки

$$H_{qx}(x, y, z) = -\frac{I}{4\pi} z(F_1(-a, -b) + F_1(+a, +b)) , \quad (2.8)$$

$$H_{qy}(x, y, z) = -\frac{I}{4\pi} z(F_2(-a, -b) + F_2(+a, +b)) , \quad (2.9)$$

$$H_{qz}(x, y, z) = \frac{I}{4\pi} ((x-a)F_1(-a, -b) + (y-b)F_2(-a, -b) + (x+a)F_1(+a, +b) + (y+b)F_2(+a, +b)) \quad (2.10)$$

В яких

$$F_1(\pm a, \pm b) = \frac{1}{(x \pm a)^2 + z^2} \left(\frac{y \pm b}{\sqrt{(x \pm a)^2 + (y \pm b)^2 + z^2}} - \frac{y \mp b}{\sqrt{(x \pm a)^2 + (y \mp b)^2 + z^2}} \right),$$

$$F_2(\pm a, \pm b) = \frac{1}{(y \pm b)^2 + z^2} \left(\frac{x \pm a}{\sqrt{(x \pm a)^2 + (y \pm b)^2 + z^2}} - \frac{x \mp a}{\sqrt{(x \mp a)^2 + (y \pm b)^2 + z^2}} \right).$$

Отримаємо вираз для напруженості магнітного поля, створюваного передавальною котушкою датчика (рис.2.5). З урахуванням малого радіусу дроту вважатимемо, що струм рівномірно розподілений по поверхні котушки. Виділимо елементарний контур висотою dz' . Для елементарного струму dI в контурі можна записати

$$dI = \frac{WI}{2c} dz' \quad (2.11)$$

де W - число витків в котушці;

I - струм в котушці;

$2c$ - висота котушки.

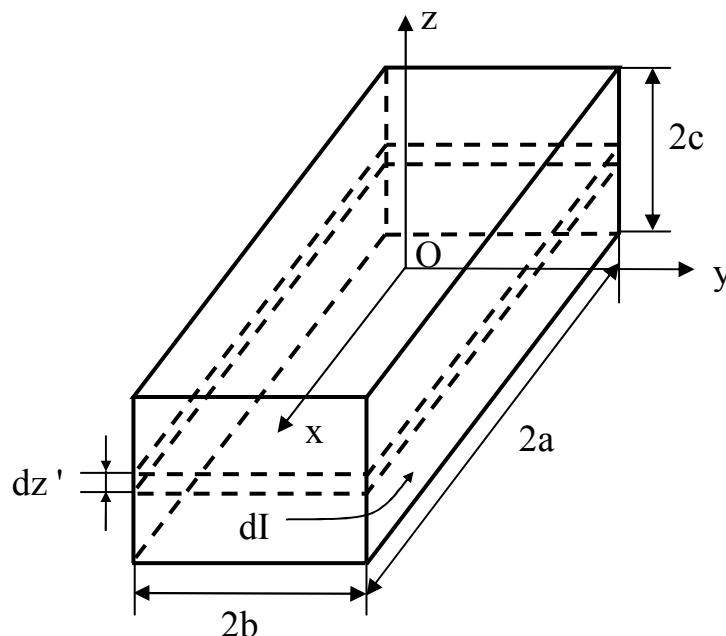


Рис.2.5. Розрахункова модель передавальної котушки датчика

Елементарний контур створює магнітне поле, що становлять напруженості якого визначаються відповідно до виразами (2.8) - (2.10). Підставивши в ці вирази замість струму I вираз (2.11) і провівши інтегрування за змінною z' , Отримаємо вирази для складових напруженості магнітного поля передавальної котушки датчика

$$H_x(x, y, z) = -\frac{WI}{8\pi c} \int_z^{z+2c} z' [F_1(-a, -b, z') + F_1(+a, +b, z')] dz' , \quad (2.12)$$

$$H_y(x, y, z) = -\frac{WI}{8\pi c} \int_z^{z+2c} z' [F_2(-a, -b, z') + F_2(+a, +b, z')] dz' , \quad (2.13)$$

$$H_z(x, y, z) = \frac{WI}{8\pi c} \int_z^{z+2c} [(x-a)F_1(-a, -b, z') + (y-b)F_2(-a, -b, z') + (x+a)F_1(+a, +b, z') + (y+b)F_2(+a, +b, z')] dz' . \quad (2.14)$$

Тоді модуль напруженості визначається виразом

$$H(x, y, z) = \sqrt{H_x^2(x, y, z) + H_y^2(x, y, z) + H_z^2(x, y, z)} . \quad (2.15)$$

Вирази (2.12) - (2.15) дозволяють визначити напруженість магнітного поля датчика без урахування впливу рейки і колеса.

Для дослідження впливу рейки і колеса рухомого складу на магнітне поле датчика розглянемо систему «датчик-рельс-колесо». У випадку електромагнітні процеси в такій системі описуються рівняннями Максвелла. Як зазначалося вище, для системи «датчик-рельс-колесо» виконується умова квазістаціонарності. Тому при аналізі даної системи можна знехтувати струмом зміщення, тобто прийняти $\partial D / \partial t = 0$. З урахуванням цього запишемо систему рівнянь Максвелла, доповнену матеріальним рівнянням для магнітної індукції

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \operatorname{rot} \vec{H} &= \sigma \vec{E} + \vec{J}_{\text{стор}} \\ \vec{B} &= \mu \mu_0 \vec{H} \end{aligned} \right\}, \quad (2.16)$$

де \vec{E} - напруженість електричного поле;

\vec{B} і \vec{H} - індукція і напруженість магнітного поля;

$\vec{J}_{\text{стор}}$ - щільність сторонньої струму (щільність струму передавальної котушки датчика);

σ і μ - питома електропровідність і магнітна проникність середовища;

μ_0 - магнітна постійна.

Введемо векторний потенціал \vec{A} , Такий що

$$\vec{B} = \operatorname{rot} \vec{A}. \quad (2.17)$$

Підставляючи (2.17) в систему (2.16), отримаємо рівняння для векторного потенціалу [93]

$$\nabla^2 \vec{A} - \sigma \mu \mu_0 \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\mu \mu_0 \vec{J}_{\text{стор}}. \quad (2.18)$$

Так як струм в передавальній котушці змінюється за гармонійним законом, то рівняння (2.18) можна привести до неоднорідного рівняння Гельмгольца [93]

$$\nabla^2 \dot{\vec{A}} + \tilde{k}^2 \dot{\vec{A}} = -\mu \mu_0 \dot{\vec{J}}_{\text{стор}} \quad (2.19)$$

де $\tilde{k}^2 = -j\omega\mu\mu_0\sigma$. Надалі точкою над символом будемо позначати комплексні величини.

Будемо вважати, що A_1, A_2, A_3 - векторні потенціали в середовищах 1 (область розташування датчика), 2 (рейок), 3 (гребінь колеса) відповідно. тоді

$$\nabla^2 \vec{A}_1 = -\mu_0 \vec{J}_{\text{стор}} , \quad (2.20)$$

$$\nabla^2 \vec{A}_2 + \tilde{k}_2^2 \vec{A}_2 = 0 , \quad (2.21)$$

$$\nabla^2 \vec{A}_3 + \tilde{k}_3^2 \vec{A}_3 = 0 , \quad (2.22)$$

де $\tilde{k}_2^2 = -j\omega\mu_p\mu_0\sigma_p$;

$\tilde{k}_3^2 = -j\omega\mu_k\mu_0\sigma_k$;

σ_p і μ_p - провідність та магнітна проникність рейкової сталі;

$\sigma_{до}$ і $\mu_{до}$ - провідність і магнітна проникливість колісної сталі.

Для вирішення завдання взаємодії колеса з електромагнітним датчиком потрібно вирішити систему рівнянь (2.20) - (2.22) спільно з граничними умовами для векторного потенціалу. Однак таке завдання вирішити важко в силу складності граничних умов. Тому для подальшого аналізу будемо використовувати розрахункову модель, яка відобразить основні співвідношення в системі «датчик-рельс-колесо» (рис.2.6).

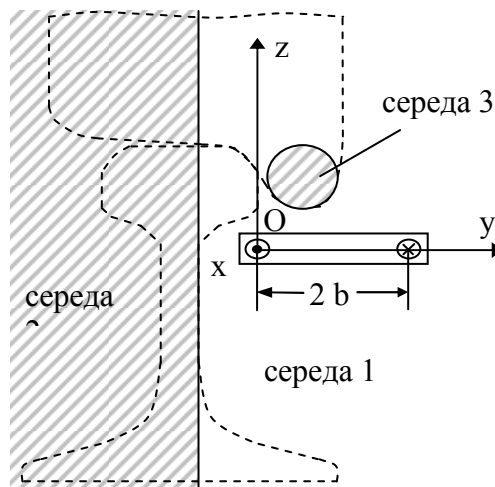


Рис.2.6. Розрахункова модель системи «датчик-рейка-колесо»

У даній моделі постійний вплив рейки на датчик враховується введенням металевої поверхні (середина 2). Гребінь колеса рухомого складу представлений у вигляді циліндра, діаметр якого дорівнює ширині гребеня (середина 3). Крім цього для зведення задачі до двовірної передавальну котушку датчика представимо у вигляді двухпроводної лінії. Для такої розрахункової моделі векторний потенціал має тільки одну складову A_x . Надалі під A будемо розуміти A_x .

Векторний потенціал в середовищі 1 представимо у вигляді суперпозиції

$$\dot{A}_1 = \dot{A}_0 + \dot{A}_p + \dot{A}_k, \quad (2.23)$$

де A_0 - векторний потенціал магнітного поля передавальної котушки у вільному просторі;

A_p і A_k - векторні потенціали вторинного поля, створюваного рейкою і колесом. Розглянемо систему «датчик-рейка» (рис.2.7). З рівнянь (2.20), (2.21) з урахуванням (2.23) отримаємо

$$\frac{\partial^2 \dot{A}_p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \dot{A}_p}{\partial z^2} = 0, \quad (2.24)$$

$$\frac{\partial^2 \dot{A}_2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \dot{A}_2}{\partial z^2} + \tilde{k}_2^2 \dot{A}_2 = 0. \quad (2.25)$$

З умови безперервності нормальні складові індукції магнітного поля і тангенціальних складових напруженості магнітного поля на межі розділу середовищ [93] отримаємо граничні умови для векторного потенціалу

$$\left. \frac{\partial \dot{A}_0}{\partial z} + \frac{\partial \dot{A}_p}{\partial z} = \frac{\partial \dot{A}_2}{\partial z} \right|_{y=-d}, \quad (2.26)$$

$$\left. \frac{\partial \dot{A}_0}{\partial y} + \frac{\partial \dot{A}_p}{\partial y} = \frac{1}{\mu_p} \frac{\partial \dot{A}_2}{\partial y} \right|_{y=-d}. \quad (2.27)$$

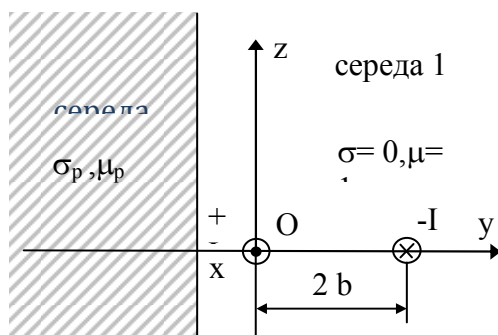


Рис.2.7. Розрахункова модель системи «датчик-рейка»

Розподіл магнітного поля двухпроводной лінії в вільному просторі відоме [93]

$$A_0(y, z) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \ln \frac{y^2 + z^2}{(y - 2b)^2 + z^2}, \quad (2.28)$$

де I - струм двухпроводной лінії.

Вирішимо рівняння (2.24), (2.25) методом Фур'є. Будемо шукати A_p у вигляді

$$A_p(y, z) = f_1(y)f_2(z). \quad (2.29)$$

Підставивши цей вираз в (2.24), отримаємо

$$\frac{1}{f_1(y)} \frac{d^2 f_1(y)}{dy^2} = - \frac{1}{f_2(z)} \frac{d^2 f_2(z)}{dz^2}.$$

У лівій і правій частині отриманого рівняння стоять функції від різних змінних. Тому ці функції повинні рівнятися деякої константи, яку позначимо λ^2 .

Отримаємо два звичайних диференціальних рівнянь

$$\frac{d^2 f_1(y)}{dy^2} - \lambda^2 f_1(y) = 0, \quad (2.30)$$

$$\frac{d^2 f_2(z)}{dz^2} + \lambda^2 f_2(z) = 0. \quad (2.31)$$

Вирішивши рівняння (2.31), отримаємо

$$f_2(z) = C_1 \sin(\lambda z) + C_2 \cos(\lambda z),$$

де C_1, C_2 - постійні.

Так як функція $A_0(y, z)$ (2.28) є парною по z , то і функція $f_2(z)$ також повинна бути парною. Тому $C_1 = 0$. Будемо вважати, що при $z = Z$ векторний потенціал A_p дуже малий. Тому

$$f_2(Z) = C_2 \cos(\lambda Z) = 0 .$$

$$\text{тоді } \lambda_n = \frac{(2n+1)\pi}{2Z}, \text{ Де } n = 0, 1, 2 \dots$$

Таким чином

$$f_2^n(z) = C_{2n} \cos(\lambda_n z) . \quad (2.32)$$

Вирішивши рівняння (2.30), отримаємо

$$f_1^n(y) = C_{3n} \exp\{-\lambda_n y\} + C_{4n} \exp\{\lambda_n y\} .$$

З огляду на умову обмеженості векторного потенціалу A_p на нескінченності, маємо

$$f_1^n(y) = C_{3n} \exp\{-\lambda_n y\} . \quad (2.33)$$

З урахуванням (2.29) (2.32) (2.33) переобозначив постійні, отримаємо загальний розв'язок рівняння (2.24)

$$A_p(y, z) = \sum_{n=0}^{\infty} C_{1n} \exp\{-\lambda_n y\} \cos(\lambda_n z) , \quad (2.34)$$

де C_{1n} - нові постійні.

Аналогічно, застосувавши метод Фур'є для вирішення рівняння (2.25), отримаємо

$$A_2(y, z) = \sum_{n=0}^{\infty} C_{2n} \exp\{\tilde{q}_n y\} \cos(\lambda_n z) , \quad (2.35)$$

де C_{2n} - постійні;

$$\tilde{q}_n = \sqrt{\lambda_n^2 - \tilde{k}_2^2} .$$

Розкладемо функцію $A_0(y, z)$ (2.28) в ряд Фур'є по $\cos\left(\frac{(2n+1)\pi}{2Z}z\right)$ на інтервалі $(-Z, Z)$

$$A_0^f(y, z) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n(y) \cos\left(\frac{(2n+1)\pi}{2Z}z\right), \quad (2.36)$$

$$\text{де } a_n(y) = \frac{2}{Z} \int_0^Z A_0(y, z) \cos\left(\frac{(2n+1)\pi}{2Z}z\right) dz.$$

Підставляючи вирази (2.34), (2.35) (2.36) в граничні умови (2.26), (2.27) і прирівнюючи вирази при $\cos\left(\frac{(2n+1)\pi}{2Z}z\right)$, Знайдемо коефіцієнти C_{1n}

$$C_{1n} = \frac{\mu_p a'_n(-d) - \tilde{q}_n a_n(-d)}{\lambda_n \mu_p + \tilde{q}_n} \exp\{-\lambda_n d\}, \quad (2.37)$$

$$\text{де } a'_n(-d) = \left. \frac{da_n}{dy} \right|_{y=-d}.$$

Отриманий вираз для коефіцієнтів C_{1n} а також вираз (2.34), дозволяють знайти векторний потенціал A_p .

Для визначення векторного потенціалу A_k розглянемо систему «датчик-гребінь колеса» (рис.2.8). Перейшовши до полярної системі координат, з рівнянь (2.20), (2.22) з урахуванням (2.23) отримаємо

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \dot{A}_k}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \dot{A}_k}{\partial \varphi^2} = 0, \quad (2.38)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \dot{A}_3}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \dot{A}_3}{\partial \varphi^2} + \tilde{k}_3^2 \dot{A}_3 = 0. \quad (2.39)$$

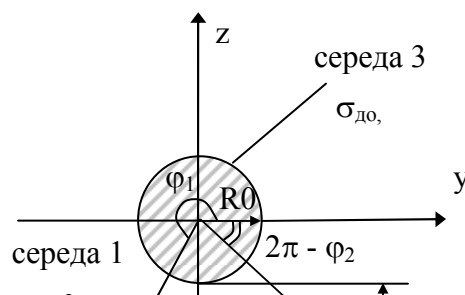


Рис.2.8. Розрахункова модель системи «датчик-гребінь колеса»

Граничні умови для даної системи мають вигляд

$$\left. \frac{\partial \dot{A}_{0p}}{\partial \varphi} + \frac{\partial \dot{A}_k}{\partial \varphi} = \frac{\partial \dot{A}_3}{\partial \varphi} \right|_{r=R_0}, \quad (2.40)$$

$$\left. \frac{\partial \dot{A}_{0p}}{\partial r} + \frac{\partial \dot{A}_k}{\partial r} = \frac{1}{\mu_k} \frac{\partial \dot{A}_3}{\partial r} \right|_{r=R_0}, \quad (2.41)$$

де $\dot{A}_{0p} = \dot{A}_0 + \dot{A}_p$;

R_0 - половина ширини гребеня колеса.

Для вирішення рівнянь (2.38), (2.39) також застосуємо метод Фур'є. Будемо шукати A_k у вигляді

$$\dot{A}_k(r, \varphi) = F_1(r)F_2(\varphi). \quad (2.42)$$

Підставляючи (2.42) в (2.38), отримаємо

$$\frac{r}{F_1(r)} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dF_1(r)}{dr} \right) = - \frac{1}{F_2(\varphi)} \frac{d^2 F_2(\varphi)}{d\varphi^2}.$$

Для виконання даного рівності необхідно, щоб ліва і права частини його дорівнювали деякій постійній, яку позначимо λ^2 . Отримаємо два звичайних диференціальних рівнянь

$$\frac{d^2 F_2(\varphi)}{d\varphi^2} + \lambda^2 F_2(\varphi) = 0, \quad (2.43)$$

$$\frac{d^2 F_1(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dF_1(r)}{dr} - \lambda^2 \frac{F_1(r)}{r^2} = 0. \quad (2.44)$$

Вирішивши рівняння (2.43), отримаємо

$$F_2(\varphi) = A \cos(\lambda \varphi) + B \sin(\lambda \varphi),$$

де A, B - постійні.

З огляду на умову однозначності $F_2(\varphi + 2\pi) = F_2(\varphi)$, отримаємо $\lambda = N$, де $n = 0, 1, 2, \dots$ Таким чином

$$F_2^n(\varphi) = A_n \cos(n\varphi) + B_n \sin(n\varphi). \quad (2.45)$$

Рівняння (2.44) являє собою рівняння Ейлера. його рішення

$$F_1^n(r) = C_n r^n + D_n r^{-n},$$

де C_n, D_n - постійні.

З огляду на вимогу обмеженості на нескінченності, отримаємо $C_n = 0$.
тоді

$$F_1^n(r) = D_n r^{-n}. \quad (2.46)$$

Таким чином, з урахуванням (2.42), (2.46), (2.40) отримаємо загальний розв'язок рівняння (2.38)

$$\dot{A}_k(r, \varphi) = \sum_{n=0}^{\infty} r^{-n} (A_n \cos(n\varphi) + B_n \sin(n\varphi)). \quad (2.47)$$

Аналогічно, застосувавши метод Фур'є для вирішення рівняння (2.39), отримаємо

$$\dot{A}_3(r, \varphi) = \sum_{n=0}^{\infty} J_n(\tilde{k}_3 r) (C_n \cos(n\varphi) + D_n \sin(n\varphi)), \quad (2.48)$$

де J_n - функції Бесселя першого роду;

C_n, D_n - постійні.

Розкладемо функцію $A_{0p}(r, \varphi)$ в ряд Фур'є за змінною φ

$$A_{0p}^f(r, \varphi) = \frac{a_0(r)}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n(r)\cos(n\varphi) + b_n(r)\sin(n\varphi)], \quad (2.49)$$

де $a_0(r), a_n(r), b_n(r)$ - коефіцієнти ряду Фур'є, $n = 1, 2, \dots$

Підставляючи вирази (2.47), (2.48) і (2.49) в граничні умови (2.40), (2.41) і прирівнюючи вирази при $\cos(n\varphi)$ і $\sin(n\varphi)$, Знайдемо коефіцієнти A_n, B_n

$$A_n = \frac{\left. \frac{\partial a_n}{\partial r} \right|_{r=R_0} - \frac{1}{\mu_k} \left. \frac{\partial J_n(\tilde{k}_3 r)}{\partial r} \right|_{r=R_0} \frac{a_n(R_0)}{J_n(\tilde{k}_3 R_0)}}{nR_0^{-n-1} + \frac{1}{\mu_k} \left. \frac{\partial J_n(\tilde{k}_3 r)}{\partial r} \right|_{r=R_0} \frac{R_0^{-n}}{J_n(\tilde{k}_3 R_0)}}, \quad (2.50)$$

$$B_n = \frac{\left. \frac{\partial b_n}{\partial r} \right|_{r=R_0} - \frac{1}{\mu_k} \left. \frac{\partial J_n(\tilde{k}_3 r)}{\partial r} \right|_{r=R_0} \frac{b_n(R_0)}{J_n(\tilde{k}_3 R_0)}}{nR_0^{-n-1} + \frac{1}{\mu_k} \left. \frac{\partial J_n(\tilde{k}_3 r)}{\partial r} \right|_{r=R_0} \frac{R_0^{-n}}{J_n(\tilde{k}_3 R_0)}}. \quad (2.51)$$

Отримані вирази для коефіцієнтів A_n, B_n а також вираз (2.47) дозволяють знайти векторний потенціал A_k в області розташування приймальних котушок. Знання векторного потенціалу A_k дозволяє досліджувати вплив колеса рухомого складу на електромагнітне поле датчика, визначити значення вихідного сигналу датчика.

2.4. Обґрунтування вибору електричних параметрів точкового колійного датчика

Для дослідження впливу проходу колеса рухомого складу над датчиком на активний і реактивний опори його передавальної котушки представимо повний опір котушки у вигляді

$$Z_1 = Z_0 + Z_{\text{внр}} + Z_{\text{внк}},$$

де Z_0 - опір котушки у вільному просторі;

$Z_{внр}$ і $Z_{внк}$ - опору, що вносяться рейкою і колесом відповідно.

Опір, що вноситься колесом, можна визначити через векторний потенціал A_k [77]

$$Z_{внк} = \frac{j\omega}{I} \oint_1 \dot{A}_k dl ,$$

де інтегрування проводиться по контуру котушки датчика.

Для обраної розрахункової моделі (рис.2.6) отримаємо

$$Z_{внк} = \frac{2aj\omega}{I} \left(\dot{A}_k(r_1, \varphi_1) - \dot{A}_k(r_2, \varphi_2) \right), \quad (2.52)$$

де $2a$ - довжина передавальної котушки;

(R_1, φ_1) , (R_2, φ_2) - координати провідників котушки.

За отриманими виразами (2.47) і (2.50) - (2.52) було розраховано опір, внесене колесом. При цьому визначали відносне внесене активну $R_{внк} / \omega L_0$ і реактивний опору $X_{внк} / \omega L_0$, де L_0 - індуктивність котушки датчика у вільному просторі. Для обраної розрахункової моделі L_0 визначається виразом [93]

$$L_0 = \frac{2a\mu_0}{\pi} \ln \frac{2b}{r_0} ,$$

де r_0 - радіус проводу котушки.

Було визначено, що для знаходження векторного потенціалу A_k , внесеного колесом, за висловом (2.47) досить перших п'яти членів ряду. Крім цього, так як аргумент функції Бесселя $(\tilde{k}_3 R_0)$ у виразах для коефіцієнтів A_n , B_n (2.50), (2.51) по модулю набагато більше одиниці, то для обчислення функції Бесселя від комплексного аргументу використовували її асимптотичне наближення [96]

$$J_n(z) \approx \sqrt{\frac{2}{\pi z}} \cos\left(z - \frac{n\pi}{2} - \frac{\pi}{4}\right) .$$

Для перевірки адекватності отриманої математичної моделі були проведені розрахунки на її основі, а також вимірювання внесеного колесом опору.

Вимірювання проводили резонансним способом [97]. Для цього до послідовного коливального контуру, що складається з котушки датчика і магазину ємностей, підключали генератор синусоїдальних коливань ГЗ-109 (рис.2.9). На фіксованій частоті, контролюючи за допомогою вольтметра ВЗ-38 вихідна напруга генератора і напруга між висновками магазину ємностей, перебудовою ємності налаштовували контур в резонанс. За відомим значенням ємності і резонансної частоти, розраховували величину індуктивності котушки. Добротність коливального контуру визначали як відношення напруги на ємності при резонансі до вихідній напрузі генератора. За значеннями добротності, ємності й індуктивності котушки розраховували її активний опір.

На фіксованих частотах 100 Гц і 1 кГц проводили вимірювання індуктивності та активного опору котушки описаним резонансним способом і за допомогою моста змінного струму Е7-14. При цьому розбіжність результатів вимірювання склало 5%.

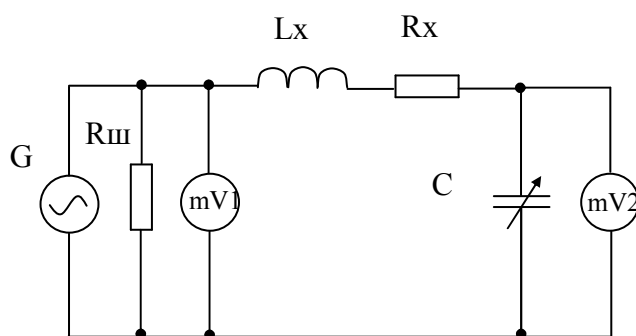


Рис.2.9. Схема для вимірювань активного опору і індуктивності передавальної котушки датчика резонансним способом

Резонансним способом визначали вносяться колесом активний опір і індуктивність на різних частотах

$$R_{\text{внк}} = R_1 - R_0, L_{\text{внк}} = L_1 - L_0,$$

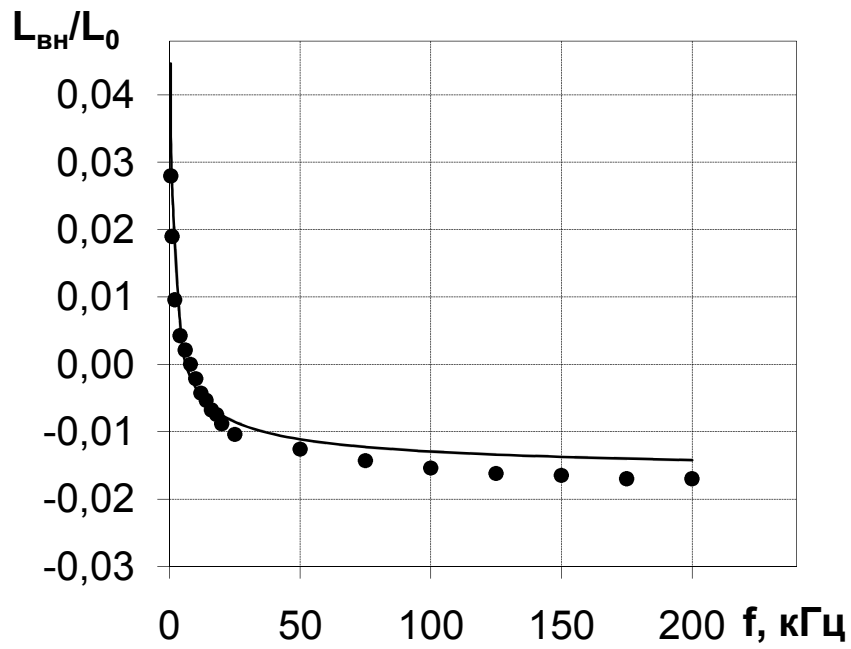
де R, L - опір і індуктивність котушки поблизу колеса,

R_0, L_0 - опір і індуктивність котушки без колеса.

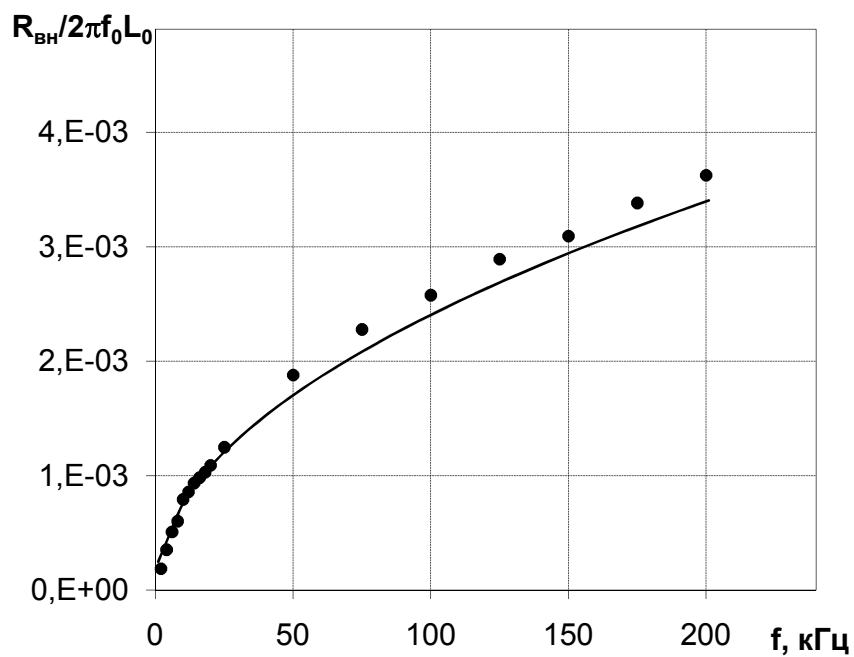
Вимірювання та розрахунки проводили для котушки розмірами $80 * 60 * 5$ при зміщенні $D = 35$ мм і зазорі $\delta = \delta_{\max} = 22$ мм. При розрахунках вважали, що $\mu_p = \mu_{до} = 100$, $\rho_p = \rho_{до} = 0,21$ Ом * мм² / м [12]. Результати представлені на рис. 2.10.

Як показують отримані залежності на низьких частотах експериментальні дані добре узгоджуються з розрахунковими. На високих частотах експериментальні значення внесених індуктивності і активного опору вище розрахункових. Це може бути обумовлено великим значенням електропровідності колісної сталі в порівнянні зі значенням, прийнятим в розрахунках. В цілому розрахункові дані задовільно узгоджуються з експериментальними, що підтверджує адекватність отриманого в розд.2.3 математичного опису.

Як видно з отриманих частотних характеристик помітний вплив колеса на індуктивність котушки датчика (рис.2.10, а) спостерігається або на низьких частотах (нижче 3 кГц), або на високих (понад 50 кГц). Очевидно, така частотна характеристика обумовлена частотними властивостями колісної сталі, як феромагнітного провідного матеріалу. На низьких частотах проявляються феромагнітні властивості колісної сталі. В результаті цього індуктивність датчика при проході колеса збільшується. На високих частотах проявляється струмовихровий ефект. У гребені колеса наводяться вихрові струми, які створюють магнітне поле, зустрічне магнітному полю датчика. В результаті цього індуктивність котушки зменшується.



(А)



(Б)

Рис.2.10. Залежність відносного внесеного реактивного (а) і активного (б) опору передавальної котушки від частоти генератора при $\delta = \delta_{\max} = 22$ мм, $D = 35$ мм, $f_0 = 100$ кГц (лінія - розрахунок, точки - експеримент)

Активний опір, внесене гребенем колеса, збільшується при збільшенні частоти від 0 до 200 кГц. При частоті 20-25 кГц також можна виділити деяку зміну швидкості збільшення $R_{внк}$ з частотою. Така частотна характеристика пов'язана з втратами в сталі на вихрові струми. Зменшення швидкості наростання $R_{внк}$ на високих частотах може бути пов'язано зі зменшенням глибини проникнення електромагнітного поля датчика в метал колеса.

Отримаємо вираз для вихідного сигналу датчика. Будемо вважати, що приймальна котушка датчика розташовується паралельно передавальній котушці. Так як вихідний сигнал трансформаторного диференційного датчика являє собою різницю напруг, наведених в приймальній котушці при наявності і відсутності колеса, то його можна визначити через векторний потенціал A_k [77]

$$\dot{U}_c = 2aj\omega \left(\dot{A}_k(r_1, \varphi_1) - \dot{A}_k(r_2, \varphi_2) \right), \quad (2.53)$$

де (r_1, φ_1) і (r_2, φ_2) - координати провідників приймальні котушки;

$2a$ - довжина приймальної котушки.

З огляду на, що величина A_k пропорційна числу витків в передавальній котушці W_1 , а вихідний сигнал U_c пропорційний числу витків в приймальній котушці W_2 , запишемо вираз (2.53) у вигляді

$$\dot{U}_c = 2aj\omega W_1 W_2 \left(\dot{A}_k^0(r_1, \varphi_1) - \dot{A}_k^0(r_2, \varphi_2) \right), \quad (2.54)$$

де A_k^0 - векторний потенціал магнітного поля, внесеного колесом, при використанні одновіткової передавальної котушки, який визначається відповідно до виразу (2.47).

Аналіз виразів (2.28), (2.47), (2.49) - (2.51) показав, що величина A_k^0 пропорційна силі струму в передавальній котушці. Таким чином

$$\dot{U}_c = j\omega W_1 W_2 I_1 \vec{\gamma}(k, f), \quad (2.55)$$

де I_1 - ток в передавальній котушці;

k - вектор параметрів, що визначають розміри котушок, їх положення і положення колеса по відношенню до котушок.

Порівнявши вирази (2.6) і (2.55), отримаємо, що $\gamma(\vec{k}, f) = \sqrt{k_{L1} k_{L2}} \Delta k_{св}$.

Таким чином, величина $\gamma(\vec{k}, f)$ характеризує зміну магнітної зв'язку між приймальною і передавальною котушками, викликане проходженням колеса над датчиком. Ця величина залежить від геометрії системи «датчик-рельс-колесо», від магнітних і частотних властивостей рейкової і колісної сталі.

З урахуванням того, що передає котушка датчика підключається до генератора, що виробляє синусоїдальну напругу $U_{ген}$, запишемо вираз для струму

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_{ген}}{(R_1 + R_{внр} + R_{внк}) + j\omega(L_1 + L_{внр} + L_{внк})}, \quad (2.56)$$

де R_1 - активний опір проводу передавальної котушки;

$R_{внр}$ і $L_{внр}$ - активний опір і індуктивність, що вносяться рейкою.

З залежностей, наведених на рис.2.9, видно, що вносяться опір і індуктивності набагато менше R_1 і L_1 . Крім цього, при роботі датчика на високих частотах реактивний опір котушки значно вище провідникові дроти. З урахуванням цього

$$\dot{I}_1 \approx \frac{\dot{U}_{ген}}{j\omega L_1} = \frac{\dot{U}_{ген}}{j\omega k_{L1} W_1^2}. \quad (2.57)$$

Підставивши (2.57) в (2.55), отримаємо

$$\dot{U}_c = \dot{U}_{ген} n \gamma_1(\vec{k}, f) \quad (2.58)$$

де $n = \frac{W_2}{W_1}$;

$\gamma_1(\vec{k}, f) = \sqrt{\frac{k_{L1}}{k_{L2}}} \Delta k_{св}$ - величина, що характеризує зміну коефіцієнта зв'язку.

Як видно з (2.58) вихідний сигнал електромагнітного ТПД залежить від багатьох параметрів. Конструкційні параметри датчика (розміри і конфігурація котушок, їх взаємне положення) впливають на розподіл його електромагнітного поля, а електричні параметри (сила струму в котушках і робоча частота, число витків в котушках) впливають на величину напруженостей магнітного і елек-

тричного полів, а також на швидкість їх зміни. Тому можна вважати, що електричні і конструкційні параметри датчика незалежно впливають на характеристики датчика.

Відповідно до виразів (2.47), (2.54) були розраховані і побудовані залежності вихідного сигналу ТКД при зміщенні $D = 35$ мм і зазорі $\delta = 22$ мм від частоти електромагнітних коливань в передавальній котушці при різних значеннях коефіцієнта n (рис.2.11). Як видно з рис.2.11 отримані залежності ви- значаються частотними властивостями колісної пари. На низьких частотах про- являються феромагнітні властивості колісної пари, на високих - струмовихро- вий ефект. На частоті близько 10 кГц ці ефекти компенсуються. При цьому вихідний сигнал датчика мінімальний. Зі зменшенням частоти від 10 кГц до 1 кГц вихідний сигнал збільшується в 1,33 рази, а зі збільшенням частоти від 10 кГц до 150 кГц - збільшується в 1,22 рази. При виборі частоти необхідно дома- гатися підвищення вихідного сигналу датчика. Однак при роботі на низьких частотах час проходження колесом зони чутливості датчика при максимальній швидкості руху виявляється порівнянним з періодом електромагнітних коли- вань в котушках датчика, що зменшує ймовірність правильного виявлення сиг- налу приймачем. При збільшенні частоти понад 150 кГц вихідний сигнал змінюється слабо. У той же час, як показали експериментальні дослідження, на частоті понад 150 кГц починають проявлятися резонансні властивості котушок датчика, що погіршує стабільність його роботи. Таким чином, можна рекомен- дувати вибирати частоту датчика рівній 150 кГц. При збільшенні частоти понад 150 кГц вихідний сигнал змінюється слабо. У той же час, як показали експериментальні дослідження, на частоті понад 150 кГц починають проявля- тися резонансні властивості котушок датчика, що погіршує стабільність його роботи. Таким чином, можна рекомендувати вибирати частоту датчика рівній 150 кГц. При збільшенні частоти понад 150 кГц вихідний сигнал змінюється слабо. У той же час, як показали експериментальні дослідження, на частоті по- над 150 кГц починають проявлятися резонансні властивості котушок датчика,

що погіршує стабільність його роботи. Таким чином, можна рекомендувати вибирати частоту датчика рівній 150 кГц.

З виразу (2.58) видно, що вихідний сигнал датчика пропорційний напрузі генератора $U_{ген}$, числу витків в приймальній котушці W_2 і обернено пропорційний числу витків в передавальній котушці W_1 . Максимально можлива напруга $U_{ген}$ обмежується напругою джерела живлення генератора. Напруга $U_{ген}$ може бути збільшено за допомогою підвищувального трансформатора. Однак його використання ускладнює конструкцію пристрою.

При зменшенні числа витків W_1 зменшується опір передавальної котушки. При цьому може знадобитися використання трансформатора між генератором і передавальною котушкою. У цьому випадку число витків в передавальній котушці може бути зменшено до одного.

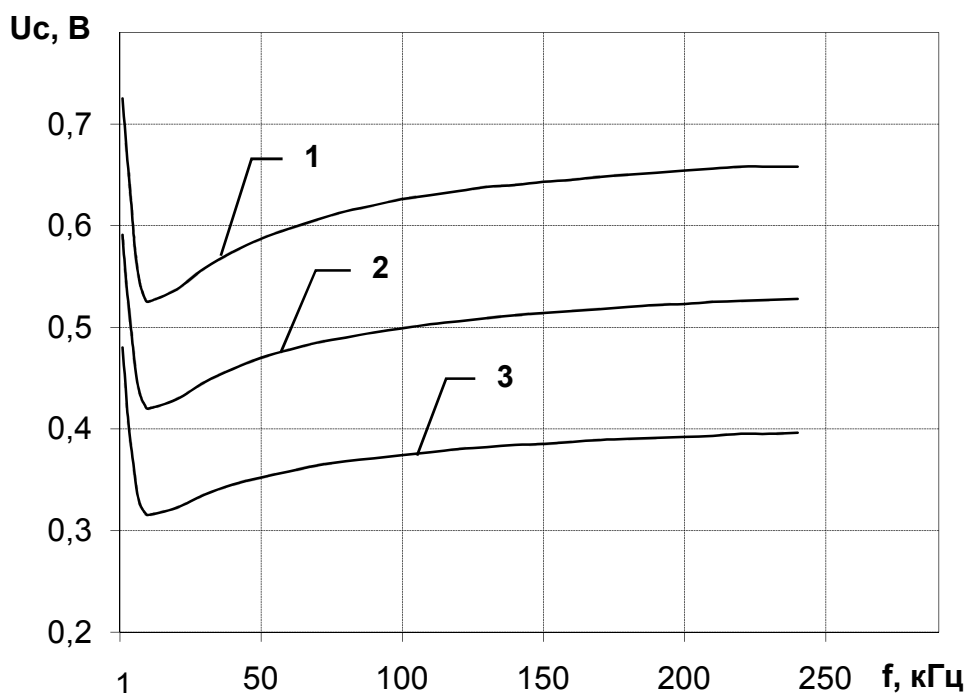


Рис.2.11. Залежність вихідного сигналу ТКД від частоти генератора:

1 - $n = 5$; 2 - $n = 4$; 3 - $n = 3$

Опір передавальної котушки можна збільшити, включивши паралельно котушці конденсатор і налаштувавши контур в резонанс. У цьому випадку

забезпечується найбільш вигідний енергетичний режим роботи генератора. Однак при цьому погіршується стабільність роботи датчика. Так температурний дрейф ємності і провідникові проводу котушки призводять до розладу передавального контуру і зміни добротності. При цьому змінюється струм через передавальну котушку, а, отже, і вихідний сигнал датчика.

Таким чином, число витків в передавальній котушці і напруга генератора повинні вибиратися з урахуванням схемотехнічних особливостей генератора.

Збільшення вихідного сигналу датчика відповідно до (2.58) можна також домогтися збільшенням числа витків в приймальній котушці. Однак при цьому збільшується омичний опір дроти і зменшується власна резонансна частота приймальні котушки. При великому числі витків резонансна частота котушки стає сумірною з робочою частотою датчика.

Таким чином, при проектуванні пристрою рахунки осей вибір параметрів $U_{ген}$, f , W_1 , W_2 необхідно проводити, враховуючи їх комплексний вплив на вихідний сигнал датчика, а також з огляду на залежності між цими параметрами. При виготовленні дослідного зразка ТПД було обрано такі параметри: $U_{ген} = 12$ В, $I_1 = 0,2$ А, $f = 150$ кГц, $W_1 = 20$, $W_2 = 100$.

2.5. Обґрунтування вибору конструкційних параметрів точкового колійного датчика

Одним з факторів, що зменшують вірогідність рахунку осей, є різний вплив коліс рухомого складу на електромагнітне поле ТПД. Положення колеса рухомого складу при проходженні зони чутливості датчика залежить від динаміки руху поїзда. Крім цього на положення колеса впливають знос його обода, підріз гребеня, наявність дефектів по колу катання, розширення колії і ряд інших причин. Значення деяких конструкційних параметрів залізничної колії, колеса і допустимих дефектів колеса по колу катання наведені в таблиці 2.1 [98-100].

Точкові шляхові датчики розташовуються поблизу рейки під гребенем колеса відповідно до розміром наближення споруд (рис.2.12) [101]. На відстань між гребенем колеса і поверхнею датчика впливають тип колеса, знос обода, наявність повзуна або навару металу по колу катання колеса. Номінальна відстань між гребенем і датчиком під час відсутності дефектів та зносу для колеса локомотива складе $\delta_{\text{номл}} = 45 - z_{\text{гл}} = 15$ мм, а для колеса вагона $\delta_{\text{нова}} = 45 - z_{\text{гв}} = 17$ мм. При граничній знос обода колеса локомотива і наявності повзуна відстань δ може зменшитися до мінімального значення $\delta'_{\text{min}} = 45 - z_{\text{гл}} - z_{\text{пр}} - Z_{\text{п}} = 4$ мм. Максимально можлива відстань між датчиком і колесом буде при наїзді колеса вагона з нульовим значенням прокату і гранично допустимим наваром $\delta'_{\text{max}} = 45 - z_{\text{гв}} + z_{\text{н}} = 19$ мм. Оскільки котушки датчика ізольовані від навколишнього середовища корпусом товщиною $\delta_{\text{до}} = 2 - 3$ мм, відстань між гребенем колеса і котушками в залежності від перерахованих випадкових чинників буде лежати в межах 6 мм (δ_{min}) - 22 мм (δ_{max}).

Таблиця 2.1

Значення конструкційних параметрів залізничної колії, колеса і допустимих дефектів колеса по колу катання, що впливають на стан гребеня колеса

Найменування параметру		позначення	Значення, мм
Висота гребеня колеса	локомотива	z _{гл}	30
	вагона	z _{гв}	28

граничні значення	прокату колеса по колу катання	zпр	9
	навару металу по колу катання колеса	zn	2
	повзуна колеса	Zп	2
Ширина колісного гребеня з подрезом		укг	25
Відстань між внутрішніми гранями колісної пари		укп	1440
Допуск на укп		удкп	3
Ширина колії (В кривих ділянках колії з радіусом кривизни менш 299 м)		ушк	1535
допустиме розширення колії		удшк	6

На горизонтальне положення гребеня колеса впливають підріз гребеня, а також розширення колії. При проході гребеня з подрезом впритул до рейки відстань між нижньою точкою гребеня і бічною поверхнею головки рейки складе $D_{\min} = y_{\text{гк}}/2 = 12,5\text{мм}$. Максимальний відхід гребеня колеса від рейки можливий в разі максимальної ширини колії, мінімальної відстані між внутрішніми гранями колісної пари і максимального підрізу гребеня $\Delta D = \text{ушк} + \text{удшк} - \text{укп} + \text{удкп} - 2\text{укг} = 54\text{ мм}$ (рис.2.13). Тоді найбільше можливе горизонтальне зміщення нижньої точки гребеня колеса по відношенню до бічної поверхні головки рейки складає $D_{\max} = D_{\min} + \Delta D = 66,5\text{ мм}$. Отримане значення ΔD узго-

джується з експериментальними даними, отриманими при дослідженні датчика ДПЕП [102].

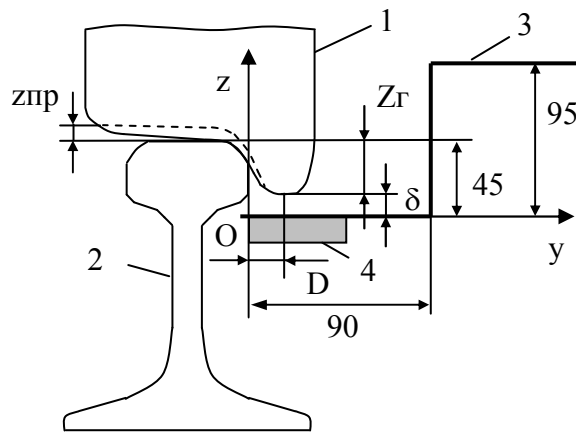


Рис.2.12. Область розташування ТКД з урахуванням габариту наближення споруд:

1 - колесо; 2 - рейок; 3 - габарит наближення споруд; 4 - датчик

Таким чином, при проходженні колеса рухомого складу над ТПД положення гребеня колеса по відношенню до датчика залежить від типу колеса, ступеня його зносу, виявлення несправностей, по колу катання, а також ряду інших причин і визначається областю (D_{\min} - D_{\max} , δ_{\min} - δ_{\max}).

Сигнал проходу осі рухомого складу на виході ТПД формується в результаті впливу гребеня колеса на електромагнітне поле датчика. Розподіл електромагнітного поля датчика залежить від конструкції його передавальної котушки. Тому, раціонально вибравши конструкцію передавальної котушки, можна зменшити вплив положення гребеня колеса, граничні значення якого визначається величинами D_{\min} , D_{\max} , δ_{\min} , δ_{\max} , на вихідний сигнал ТПД. Це дозволить зменшити дисперсію амплітуди вихідного сигналу датчика, в результаті чого підвищиться достовірність його виявлення, а, отже, і достовірність підрахунку числа осей.

Відповідно до виразами (2.12) - (2.15) було розраховано магнітне поле передавальної котушки датчика. Для перевірки адекватності математичного опису

(2.12) - (2.15) були проведені вимірювання напруженості магнітного поля передавальної котушки датчика. Для цього використовували вимірювальний зонд у вигляді круглої котушки діаметром 8 мм і кількістю витків $W_{\text{изм}} = 50$, який підключали до мільвольтметра ВЗ-38. Зонд переміщали уздовж осей координат над передавальною котушкою, визначаючи при цьому показання мільвольтметра $U_{\text{изм } x}$, $U_{\text{изм } y}$, $U_{\text{изм } z}$. За свідченнями мільвольтметра розраховували значення складових напруженості магнітного поля [92]

$$H_i = \frac{U_{\text{изм } i}}{2\pi f \mu_0 W_{\text{изм}} S_{\text{изм}}},$$

де H_i - і-а компонента напруженості;

$U_{\text{изм } i}$ - свідчення мільвольтметра при орієнтації осі вимірювального зонда уздовж і-ої осі координат, $i = 1, 2, 3$;

$S_{\text{изм}}$ - площа вимірювального зонда.

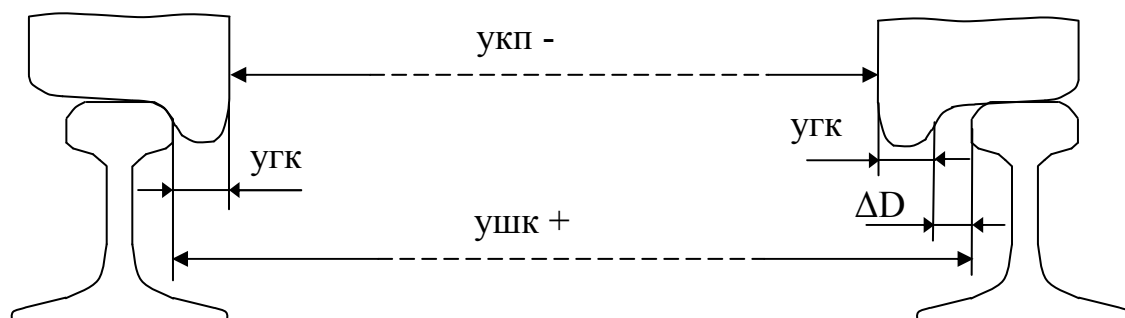


Рис.2.13. Максимальна горизонтальне зміщення гребеня колеса по відношенню до рейки

На рис.2.14 наведено залежності напруженості магнітного поля передавальної котушки від координати y при $x = 0$, $z = 10$ мм (1) і $z = 20$ мм (2), побудовані за експериментальними і розрахунковими даними. При розрахунках і вимірах початок координат було вибрано посередині верхньої сторони котушки (рис.2.5). Як показують отримані характеристики, на висоті 20 мм від поверхні котушки магнітне поле розподілено більш рівномірно, ніж на висоті 10 мм. В силу того, що вимірювальний зонд не є точковим, експериментальне розподіл

магнітного поля на висоті 10 мм вийшло більш пологим, ніж розрахункове розподіл. В цілому експериментальні дані задовільно узгоджуються з розрахунковими, що підтверджує адекватність отриманого математичного опису (2.12) - (2.15).

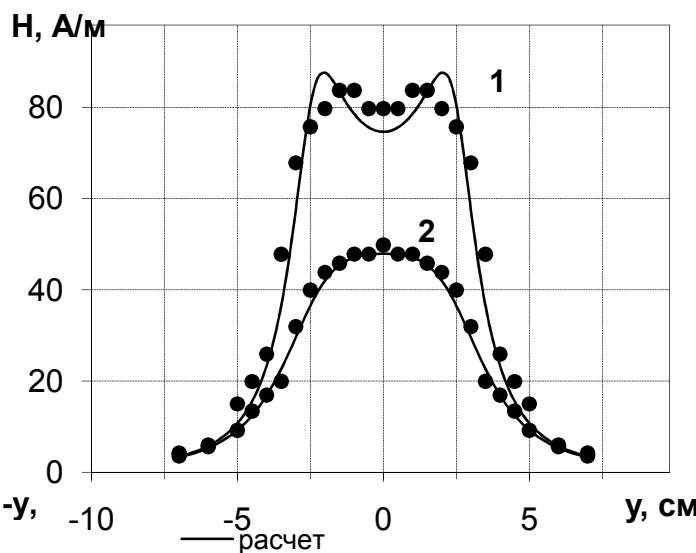


Рис.2.14. 3. $-y,$ -10 -5 0 5 $y,$ см \rightarrow передавальної котушки датчика від координати y :

1 - на висоті 10 мм від поверхні котушки; 2 - на висоті 20 мм

На рис.2.15 наведені розрахункові залежності напруженості магнітного поля передавальної котушки датчика від координат x і y на висоті $z = \delta_{\min}$ (А), $z = \delta_{\max}$ (Б) від поверхні котушки. Як показують отримані графіки, напруженість магнітного поля зменшується більш ніж в два рази при збільшенні відстані від δ_{\min} до δ_{\max} . При цьому розподіл магнітного поля на висоті δ_{\max} більш рівномірний, ніж на висоті δ_{\min} .