

Міністерство освіти і науки України  
Український державний університет науки і технологій

Факультет «Комп'ютерні технології і системи»


Кафедра «Автоматика та телекомунікації»

Пояснювальна записка  
до кваліфікаційної роботи  
на здобуття освітнього ступеня «магістр»

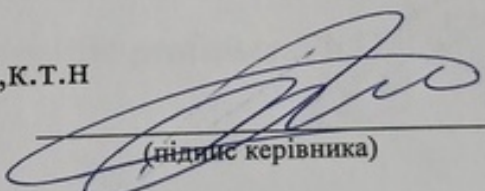
на тему: Підвищення перешкодостійкості нормального режиму роботи рейкових кіл в умовах дії перешкод тягового струму.

за освітньою програмою «Автоматика та автоматизація на транспорті»  
зі спеціальності: 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Виконав: студент групи СК2222 (968М)

  
\_\_\_\_\_ / Вячеслав ОЛЕЙНИКОВ /  
(підпис студента)

Керівник: ас. Каф.АТ,к.т.н

  
\_\_\_\_\_ / Антон ЖУРАВЛЬОВ /  
(підпис керівника)

Засвідчую, що у цій роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис студента)

Дніпро – 2024 рік

**Ministry of Education and Science of Ukraine**  
**Ukrainian State University of Science and Technologies**  
**Faculty of Computer Technologies and Systems**  
**Department of Automation and Telecommunication**

Explanatory Note  
to Master's Thesis  
master  
(higher education degree)

on the topic: Increased resistance to normal operation of the rack racks in the washbasins due to the transfer of the traction stream.

according to educational curriculum: «Automation and automation in transport»  
in the Specialty: 151 «Automation and computer-integrated technologies»

Vikonav: student of group SK2222 (968M)

/ Vyacheslav OLEINIKOV /

Scientific Supervisor: acientific professor.,Ph.D

/ Anton ZHURAVLOV /

**Міністерство освіти і науки України**  
**Український державний університет науки і технологій**

Факультет: Комп'ютерні технології та системи

Кафедра: Автоматика та телекомунікації

Рівень вищої освіти: магістр

Освітня програма: Системи керування рухом поїздів

Спеціальність: 273 Залізничний транспорт

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АТ

\_\_\_\_\_ Володимир ГАВРИЛЮК

(підпис)

Дата \_\_\_\_\_

**З А В Д А Н Н Я**

на кваліфікаційну роботу

магістр

(ступінь вищої освіти)

студенту Олейніков Вячеслав Андрійович

(Прізвище, Ім'я, По батькові)

1. Тема роботи: Підвищення перешкодостійкості нормального режиму роботи рейкових кіл в умовах дії перешкод тягового струму.

Керівник роботи: к.т.н. Журавльов Антон Юревич

(Прізвище, Ім'я, По батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом від

«  »

2022 р.

№

2. Строк подання студентом роботи: \_\_\_\_\_ .2023 р.

3. Вихідні дані до роботи: Нормативна документація та регулювальні таблиці,

Алгоритм: розрахунку РК; отримання граничних циклів намагнічування.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно опрацювати):

4.1 ВСТУП

РОЗДІЛ 1. рейкове коло – історія та статистика відмов

4.2 РОЗДІЛ 2. Аналіз існуючих методі розрахунку рейкових кіл.

Класичні методи розрахунку.

4.3 РОЗДІЛ 3. Гістерезис.

Розрахунок рейкового кола з використанням петлі гістерезису.

4.4 Висновки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

Статистика відмов, принципова схема рейкового кола,

схема заміщення рейкового кола, гістерезис.

6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Завдання видав: (підпис консультанта, дата)	Завдання прийняв: (підпис студента, дата)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ, Розділ 1		30%
2	Розділ 2.		45%
3	Розділ 3.		60%
4	Розрахунки		80%
5	Графічна частина		90%
6	Вісновки		100%
7	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри		
8	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії		

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

Вячеслав ОЛЕЙНИКОВ

\_\_\_\_\_ (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ (підпис)

Антон ЖУРАВЛЬОВ

\_\_\_\_\_ (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

## РЕФЕРАТ

**Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра:**

74 сторінок, 17 малюнків, 9 таблиць, 2 додатки, 9 джерел літератури.

**Об'єкт розробки** - підвищення перешкодостійкості нормального режиму роботи РК в умовах дії перешкод тягового струму

**Мета роботи** - Метою дослідження є підвищення перешкодостійкості нормального режиму роботи РК в умовах дії перешкод тягового струму.

**Методи дослідження** – методи розрахунку рейкових кіл, теорія чотирьохполюсників, експериментальні дослідження електричних та фізичних процесів в магнітопроводі дросель-трансформатора.

У першому розділі приведений історія розвитку рейкового кола, та наведено статистичний аналіз відмов рейкових кіл. Проаналізована робота рейкових кіл за період з 2017-2022 р., а також виконаний аналіз несправностей, які виникають у рейкових колах.

У другому розділі наведено класичне РК 25 Гц і принцип її дії, схема заміщення, основні рівняння та метод розрахунку класичним методом, висновок по класичному методу розрахунку рейкових кіл й обґрунтування необхідності застосування альтернативного методу.

В третьому розділі приведений відомості про вибір апроксимуючої моделі та отримання параметрів ДТ при зміні його характеристик, розрахунок рейкового кола якої з використанням петлі гістерезису й знаходження невідомих змінних, висновок щодо впровадження методу розрахунку рейкових кіл з використанням петлі гістерезису

**Висновок.** розглянутий метод може знайти застосування в дослідженнях і розрахунках рейкових кіл систем СЦБ, що сприяє підвищенню експлуатаційній надійності РК.

**Ключові слова:** СИГНАЛІЗАЦІЯБ, ЦЕНТРАЛІЗАЦІЯ ТА БЛОКУВАННЯ, ФЕРОМАГНЕТІКА, РЕЖИМИ РОБОТИ, РЕЙКОВІ КІЛА, ЗАЛІЗНИЧНА АВТОМАТИКА І ТЕЛЕМЕХАНІКА.

**ЗМІСТ**

<b>ВСТУП</b>	<b>8</b>
<b>РОЗДІЛ 1. РЕЙКОВЕ КОЛО.</b>	<b>9</b>
<b>1.1. Історія розвитку рейкового кола.</b>	<b>9</b>
<b>1.2. Статистичний аналіз відмов рейкових кіл.</b>	<b>14</b>
<b>1.2.1. Статистичний огляд відмов апаратури РК.</b>	<b>19</b>
<b>РОЗДІЛ 2. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО РЕЙКОВІ КОЛА І ЇХ СТАНДАРТНІ МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ.</b>	<b>20</b>
<b>2.1. Устрій і принцип дії рейкових кіл.</b>	<b>20</b>
<b>2.1.1. Призначення рейкових кіл та їхня класифікація.</b>	<b>20</b>
<b>2.1.2. Електричні параметри рейкових кіл.</b>	<b>24</b>
<b>2.1.3. Параметри колійних приймачів.</b>	<b>29</b>
<b>2.1.4. Основні режими роботи рейкових кіл.</b>	<b>31</b>
<b>2.2. Основи розрахунку й аналізу рейкових кіл.</b>	<b>37</b>
<b>2.2.1. Завдання, розв'язувані при розрахунку й аналізі.</b>	<b>37</b>
<b>2.2.2. Способи одержання вихідних даних для аналізу й розрахунку.</b>	<b>37</b>
<b>2.2.2.1. Параметри генераторів.</b>	<b>38</b>
<b>2.2.2.2. Параметри приймачів.</b>	<b>39</b>
<b>2.2.2.3. Параметри прохідних чотириполюсників апаратури.</b>	<b>41</b>
<b>2.2.2.4. Параметри рейкової лінії.</b>	<b>43</b>
<b>2.2.2.5. Параметри кабельної лінії.</b>	<b>48</b>
<b>2.2.3. Розрахунок рейкових ланцюгів з використанням</b>	

	7
чотириполюсної моделі.	52
2.2.3.1. Розрахунок нормального режиму.	52
2.2.3.2. Приклад розрахунку нормального режиму рейкового кола змінного струму частотою 25 Гц із реле типу ДСШ-13.	55
2.2.3.3. Розрахунок шунтового режиму.	60
2.2.3.4. Приклад розрахунку шунтового режиму рейкового кола змінного струму частотою 25 Гц із реле типу ДСШ-13.	62
2.3. Висновок по класичному методу розрахунку рейкових кіл й обґрунтування необхідності застосування альтернативного методу.	64
<b>РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК РЕЙКОВОГО КОЛА З ВИКОРИСТАННЯМ ПЕТЛІ ГІСТЕРЕЗИСУ.</b>	66
3.1. Загальні відомості про станцію, розрахунок рейкового кола якої наведено в роботі.	66
3.2. Оцінка граничної асиметрії опорів рейкових ліній.	67
3.3. Вибір математичної моделі петлі гістерезису.	67
3.4. Суть методу розрахунку рейкового кола з використанням петлі Гістерезису й знаходження невідомих змінних.	69
3.5. Короткий порядок розрахунку рейкового кола з використанням петлі Гістерезису.	72
3.6. Висновок щодо впровадження методу розрахунку рейкових кіл з використанням петлі Гістерезису.	77
<b>ЛІТЕРАТУРА</b>	78
Додаток А	80
Додаток Б	81

## ВСТУП

На системи залізничної автоматики і телемеханіки (СЗАТ) покладена важлива роль у забезпеченні безпеки руху поїздів, одним з елементів якої, є рейкові кола (РК). РК схильні до впливу дестабілізуючих чинників, таких як кліматичні умови, електромагнітні завади тягового струму рейкової мережі. Що значно зменшує експлуатаційну надійність роботи РК, призводить до їх відмов, і, як наслідок, до перекриття світлофорів.

Таким чином, підвищення перешкодостійкості режимів роботи РК, в умовах впливу перешкод тягового струму, є важливим науково-практичним завданням, вирішення якого дозволить організувати технологічний процес перевезень з максимальною ефективністю і безпекою руху поїздів.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дослідження є підвищення перешкодостійкості нормального режиму роботи РК в умовах дії перешкод тягового струму.

Для досягнення зазначеної мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз: роботи рейкової лінії і рейкових кіл в умовах впливу перешкод тягового струму; існуючих засобів підвищення експлуатаційної надійності рейкових кіл і забезпечення електромагнітної сумісності пристроїв сигналізації, централізації та блокування (СЦБ) з системою тягового електропостачання на залізничному транспорті;

- провести аналіз математичної моделі, яка описує електромагнітні процеси при дослідженнях роботи феромагнетика (ФМ), та оцінити електричні параметри в об'єктах з ФМ, що працюють в нелінійній області основної кривої намагнічування  $b(h)$ , проаналізувати вплив перешкод постійного тягового струму на нормальну роботу апаратури РК, удосконалити метод розрахунку режимів роботи РК.

## РОЗДІЛ 1. РЕЙКОВЕ КОЛО

### 1.1. Історія розвитку рейкового кола

Рейкові кола (РК) є основним елементом практично всіх пристроїв залізничної автоматики й телемеханіки (АТ): автоблокування (АБ), автоматичної локомотивної сигналізації (АЛС), автоматичної локомотивної сигналізації з автоматичним регулюванням швидкості (АЛС-АРС), електричної централізації стрілок і сигналів (ЕЦ), диспетчерського контролю за рухом поїздів (ДК) і інших систем. У цих системах РК виконують наступні функції: автоматично контролюють вільність і цілісність рейкових ниток ділянок колії на перегонах і станціях; виключають можливість переведення стрілок під рухомим складом; з їхньою допомогою передаються кодові сигнали з колії на локомотив, а також від одної сигнальної установки до іншої; забезпечується автоматичний контроль наближення поїздів до переїздів і станцій і т.д. РК мають цінні властивості: автоматично контролюють вільність і зайнятість ділянок колії без якого-небудь устаткування на рухомому складі, автоматично контролюють електричну цілісність рейкових ниток, забезпечують територіальну селективність при передачі інформації з колії на локомотив. На магістральних залізницях і метрополітенах СНД застосовують більше 30 типів й 800 різновидів РК. Загальне число РП, експлуатованих у СНД, перевищує 300 000. Широко поширені вони й у більшості країн миру.

РК мають більш ніж вікову історію, і їхня практика й теорія пов'язані з історією виникнення й розвитку залізничного транспорту й, зокрема, з історією сигналізації й колійний АБ.

Перша у світі залізниця з локомотивно-канатною тягою була відкрита у Великобританії 27 вересня 1825 року між Стоктоном і Дарлінгтоном. У Росії першу залізницю на паровій тязі довжиною 29 верст побудували між Петербургом і Царським селом і відкрили 30 жовтня 1837 року. На початковому етапі пристрої сигналізації були досить примітивні: прапорець і ліхтар.

Найважливішим досягненням 50-60 років XIX століття в області забезпечення безпеки руху поїздів став винахід блокування й централізації. Блокування одержало назву від англійського слова *to block*, що означає обгороджувати. Безумовною приналежністю блокування є постійний колійний сигнал, що, будучи закритим, обгороджує залізничну ділянку від в'їзду на нього поїздів.

Розвиток блокувальних пристроїв пройшло три етапи - це неавтоматичне, напівавтоматичне і автоматичне блокування.

У другій половині XIX століття в Європі прагнули вдосконалювати системи безпеки, тобто поліпшити блокувальні апарати неавтоматичної або напівавтоматичної дії.

У той же час американські дороги акцентували увагу винятково на автоматичному блокуванні, у якій автоматична дія сигналів залежала від безупинно контрольованого стану колії. Це завдання вперше було вирішено американцем Вільямом Робінзоном в 1867 році, а в 1870 році на ділянці Філадельфія - Ері вперше була застосовано автоблокування з нормально розімкнутими РК.

В 1872 році В. Робінзон запропонував нормально замкнену РК, що одержала визнання й зробила переворот в області пристроїв сигналізації, централізації й блокування (СЦБ).

Початком нової ери в розвитку РК можна вважати 1902 рік. Для живлення РК уперше був використаний змінний струм (до цього застосовувався тільки постійний), що спростило самі пристрої РК і дозволило обладнати ними електрифіковані залізниці. Рейкові кола, у яких тяговий струм протікав по двох нитках, одержали назву двоколієвих (двониткових). Вперше подібні РК були використані в Каліфорнії. РК змінного струму стали витіснити РК постійного струму й на ділянках з паровою тягою. В 1906 році деякі дороги поблизу Нью-Йорка були електрифіковані по системі змінного струму з напругою в контактній мережі 11 кВ частотою 25 Гц. В 1908 році було розроблено двоелементне індукційне секторне реле, що володіє гарними

енергетичними характеристиками. Ці реле застосовують у багатьох країнах миру й по теперішній час. Таким чином, удосконалене РК стало одним з найважливіших відкриттів в області залізничної техніки, що винятково надійно забезпечувало безпеку руху поїздів. В 1910 році американська міжвідомча комерційна комісія констатувала: «Імовірно, немає жодного винаходу в історії розвитку залізничного транспорту, за допомогою якого можна було б настільки забезпечити рух поїздів, наскільки дозволило це зробити застосування рейкових кіл. Цим простим самим по собі винаходом була покладена основа для розвитку інших більш складних автоматичних систем, при яких поїзд обгороджує себе від небезпеки за допомогою впливу на відповідні сигнали. Інакше кажучи, рейкове коло стало основою автоматичної сигналізації». У Європі перші РК з'явилися на початку ХХ століття на міських (підземних і наземних) залізницях у Лондоні, Парижі, Берліні, Гамбурзі й трохи пізніше на приміських ділянках.

Рейкові кола виявилися настільки гнучким пристроєм, що з'явилася можливість їхнього використання не тільки в АБ, але й в інших системах забезпечення безпеки руху поїздів. Вони знайшли застосування на станціях, у пристроях АЛС, АРС, на переїздах і т.д.

З удосконалюванням РК на залізницях США і Європи з'явилися пропозиції по використанню рейкової лінії (РЛ) як лінії зв'язку для безперервної передачі інформації на локомотив про показання попереду стоячого сигналу.

Перша двозначна АЛС безперервної дії була впроваджена в 1923 році на одній з ділянок Пенсільванської залізниці. Ця система стала початком розвитку кодових РК. В 1925 році була впроваджена тризначна АЛС.

Питання про застосування РК у Росії було вперше піднято у 1901 році, однак перша дослідна ділянка, обладнана автоблокуванням довжиною 3 км із РК, була побудована тільки у 1915 році.

Реально РК стали широко використовувати в СРСР для контролю стану блок-діляниць на перегонах і станційних ділянках з моменту будівництва АБ та

ЕЦ. Перші ділянки АБ Москва - Митіщі й Покровсько – Стрешнево - Волоколамск Московської залізниці, побудовані на імпортному устаткуванні, почали експлуатувати в 1931 році. Починаючи з 1932 року АБ стали будувати на вітчизняних апаратурах. Ділянка Основа - Червоний Лиман Донецької дороги була першою, побудованою на вітчизняному устаткуванні.

Основні роботи над створенням пристроїв АЛС почалися з будівництва на ділянці Москва - Володимир в 1935 році вітчизняної системи АЛС без колійних світлофорів і колійних приймачів, запропонованої інженером А. Ф. Булатом. У ній відбилися перспективні напрямки вдосконалювання РК - використання РК без ізолюючих стиків із централізованим розміщенням апаратури.

З 1952 року стали застосовувати, як основне, числове кодове автоблокування із пристроями АЛС. У цій системі передача інформації між сигнальними точками, а також з колії на локомотив здійснювалася по РЛ числовим кодом. Найбільш принципові рішення збереглися в ній і по теперішній час. Надалі систему АЛС доповнили пристроями контролю швидкості, розширювали функціональні можливості РК і підвищували надійність їхньої роботи. У плані підвищення надійності особливу увагу розробників привертала задача відмови від найменш надійного елемента - ізолюючих стиків. Ще в 1908 році в США на ділянці з електротягою постійного струму побудували безстиківі рейкові кола (БРК) частотою 25 Гц із моторними фазочутливими колійними реле. З 50-х - 60-х років БРК стали застосовувати у Франції, Японії й США. В 70-і роки в СРСР розробили систему інтервального регулювання із централізованим розміщенням апаратури для магістрального транспорту, метрополітену й швидкісного трамвая, основою якої стали рейкові кола без ізолюючих стиків.

Для живлення РК змінного струму спочатку використали промислову мережу або машинний перетворювач. Частота живлення РК перебувала в діапазоні до 100 Гц. Необхідність збільшення обсягу й швидкості передачі інформації на локомотив необхідне підвищення частоти сигнального струму.

Винахід в 1948 році транзистора дозволило застосувати в РК підвищені частоти.

У цей час у РК використовують діапазон частот від 0 до 20 кГц. Вибір частоти сигнального струму є принциповим з погляду підвищення граничних довжин РК, забезпечення їхньої працездатності при зниженому опорі ізоляції рейкових ниток щодо баласту, збільшення обсягу переданої інформації, захисту апаратур від перешкод і т.д.

З 50-х років спостерігається тенденція в поділі каналів зв'язку для автоблокування й АЛС. Рейкові кола з ізолюючими стиками живляться сигнальним струмом переважно на низьких частотах (до 125 Гц), що забезпечує їхню більшу довжину. Для передачі інформації на локомотив використовують підвищені частоти, що забезпечують більший обсяг і високу швидкість передачі інформації. Підвищені частоти призначені й для реалізації коротких РК, наприклад, на переїздах і рейкових колах без ізолюючих стиків.

Починаючи з 60-х років у деяких країнах стали використати РК і системи інтервального регулювання із централізованим розміщенням апаратур, при якій рейкова лінія на перегоні вільна від апаратури, розташованої в станційному приміщенні. У цей час подібні системи застосовують у США, Японії, країнах СНД й інших державах.

На метрополітенах СРСР із 1972 року стала застосовуватися нова система регулювання руху поїздів - автоматична локомотивна сигналізація з автоматичним регулюванням швидкості (АЛС-АРС).

Безстиківі рейкові кола знаходять усе більш широке застосування на лініях магістрального транспорту й метрополітену СНД.

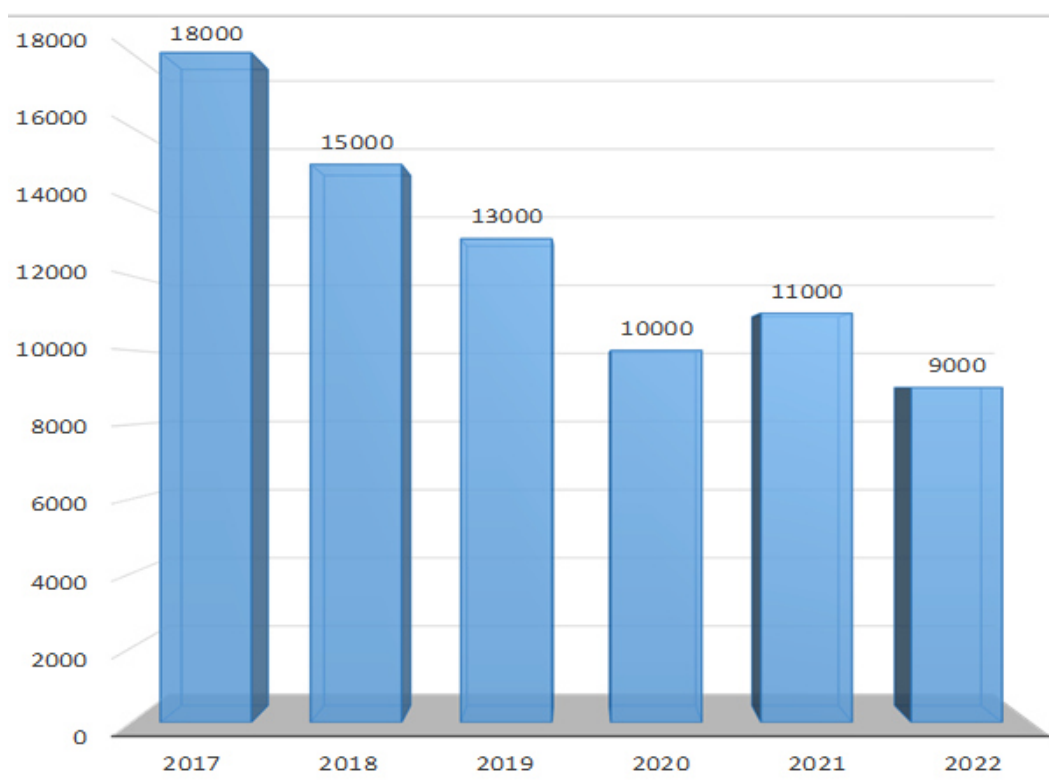
## 1.2. Статистичний аналіз відмов рейкових кіл

Для отримання достовірної та об'єктивної інформації про роботу РК проведено аналіз за наступними критеріями:

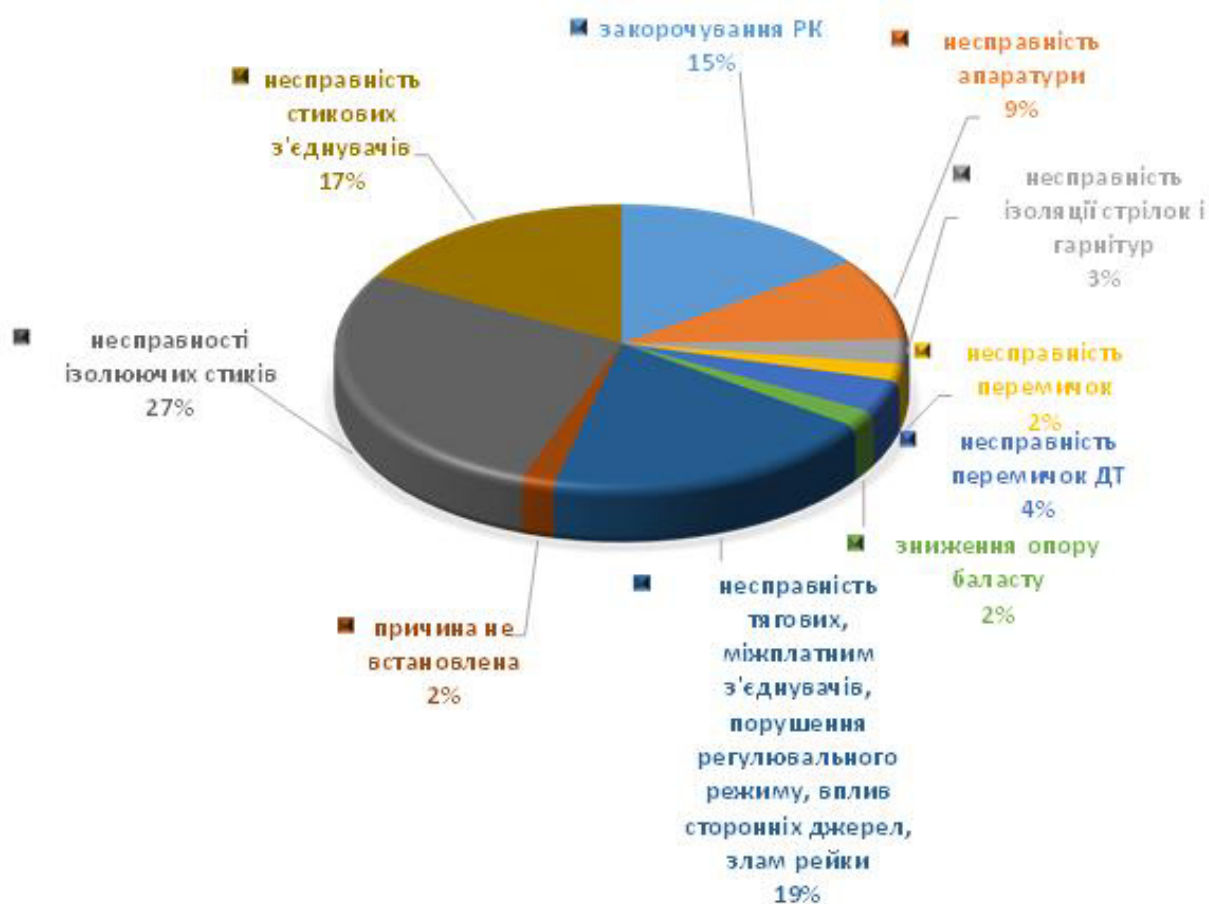
- віднесення відмови РК до того чи іншого господарства або стороннім причин, безпосередньо не пов'язаних з працівниками залізниці;
- розподіл відмов РК по дорогах як в абсолютному вираженні, так і за питомими показниками (на технічну одиницю або на одиницю пристроїв);
- розподіл відмов елементів рейкового кола;
- динаміка числа відмов в рейкових колах.

На мережі залізниць України знаходяться в експлуатації більше 100 тис. станційних і більше 25 тис. перегінних РК. З 2017 року по теперішній час число їх відмов знижено більш ніж на 20 %, проте за абсолютним значенням залишається ще неприпустимо великим.

Динаміка зміни кількості відмов РК за 2017-2022 рр. наведена на мал.1.1.



Малюнок 1.1 – Динаміка зміни відмов РК (2017-2022 рр)



Малюнок 1.2 – Основні причини відмов РК

Відмови РК складають майже половину загального числа порушень нормальної роботи пристроїв СЦБ.

За даними аналізу за розглянутий період найбільш характерними причинами відмов елементів РК (мал.1.2) є:

- несправність ізолюючих стиків (27%),
- несправність (в тому числі обрив) стикових з'єднувачів (17%);
- закорочування РК (15%);
- несправність апаратури (9%);
- несправність ізоляції стрілочного переводу (3%);

- 29% припадають на інші причини (несправність ізоляції стрілок і гарнітур, сталевих і дросельних перемичок, зниження опору баласту, злами рейки та ін.).

Як видно, однією з основних причин відмови ізолюючих стиків є закорочування стику металевою стружкою внаслідок намагнічування рейок і появи зовнішнього магнітного поля, що створюється намагніченими торцями рейок, розділених ізолюючим стиком. Для виявлення передказного стану ізолюючих стиків необхідний відповідний інструментарій, зокрема розробка вимірювального засобу для діагностики ізолюючого стику, крім того, металополімерного типу, що містить металевий стрижень всередині полімеру, провести оцінку параметрів, що виключає намагніченість торця рейки.

Основними причинами, що призводять до відмов стикових з'єднувачів всіх типів, є їх пошкодження при колійних роботах, корозії і неякісній приварка. Крім того, практичний досвід показує, що недостатньо ефективно проводиться вхідний контроль з'єднувачів, що надходять на залізниці [Разгонов О соединителях]. Відмови стикових з'єднувачів приварного типу відбуваються через обрив з'єднувача в місці його приварювання до рейки внаслідок порушення технології приварювання.

Розглянемо розподіл відмов апаратури РК.

Апаратура РК вносить найістотніший внесок в загальну кількість відмов, проте абсолютні показники таких відмов залишаються досить великими.

Всі наведені положення відносяться до роботи традиційних релейних РК [13]. В останні роки активно впроваджуються системи АБ з рейковими колами тональної частоти (ТРК). Ці РК побудовані на новій елементній базі, менш критичні до опору баласту, і, що найголовніше, не вимагають наявності ізолюючих стиків. Тому основне навантаження щодо забезпечення працездатності ТРК доводиться на працівників дистанцій сигналізації та зв'язку.

Результати аналізу дозволяють сформулювати чотири групи завдань, вирішення яких дозволить підвищити надійність функціонування пристроїв СЦБ в цілому і РК зокрема.

1. Організаційні, покликані впорядкувати процес обслуговування РК і чітко регламентувати його.
2. Нормативні, які поряд з організаційними дозволяють експлуатаційного штату застосовувати стандартні процедури обслуговування, посилять контроль за технічним станом РК, дадуть можливість точніше і своєчасно відстежувати відмови, збої і відхилення параметрів РК.
3. Технічні, спрямовані на вдосконалення якості функціонування як елементів РК, так і РК в цілому на основі затверджених і розроблених нових технічних рішень.
4. Інноваційні, при необхідності забезпечують функціонування пристроїв СЦБ на основі методів, альтернативних рейковим колам, а також комбінованих.

Проведений аналіз роботи РК свідчить про необхідність більш суворої регламентації параметрів елементів РК і процедур обслуговування, впровадження технічних засобів діагностики, або технічних засобів, що виключають відмови наслідки помилок роботи схем СЦБ. Всі порушення і відмови в роботі повинні бути впорядковані і зафіксовані. Це дозволяє більш детально аналізувати роботу РК, аж до елементів, і на підставі цього аналізу розробляти адекватні заходи і рекомендації з експлуатації пристроїв в різних умовах. Назріла необхідність галузевої стандартизації як параметрів елементів РК, так і процедур обслуговування і технічного ремонту.

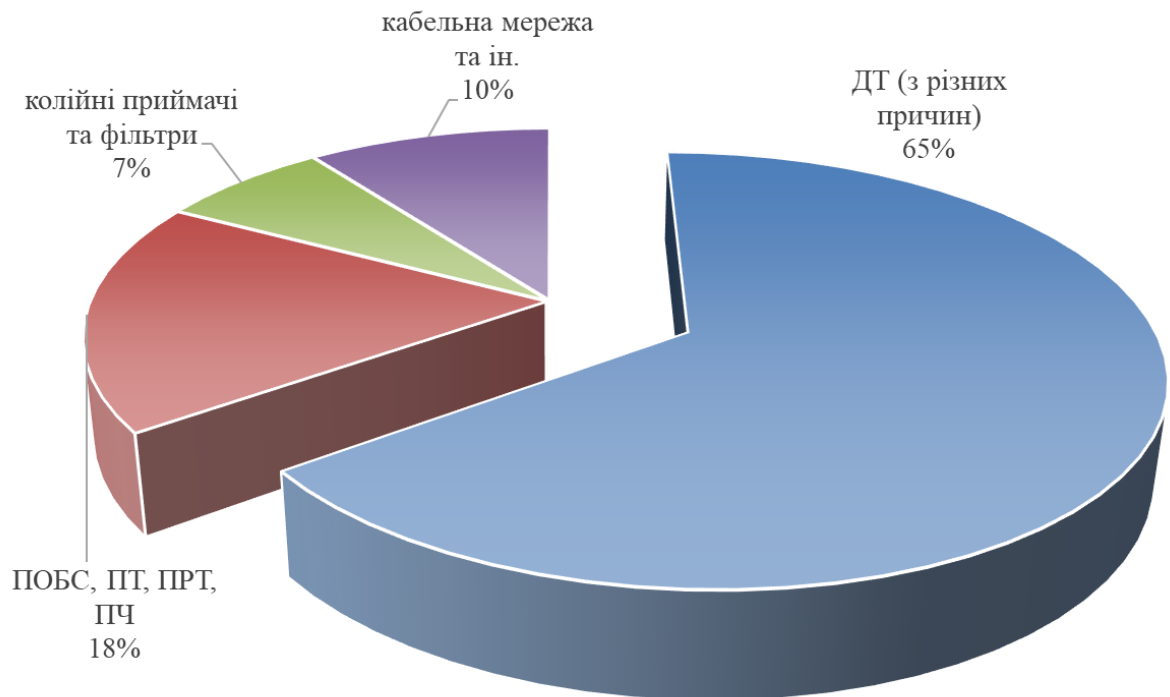
Відсутність регламентних процедур по вимірюванню залишкової намагніченості рейок, наявність нелінійних залежностей намагніченості від струму, що протікає ще більш ускладнюють ситуацію. В цьому випадку необхідно не тільки нормувати параметр намагніченості, а й ретельно

опрацювати питання про замикання магнітного потоку, створюваного двома торцями рейок не по повітрю, а через ізолюючий стик. Як додатковий засіб контролю роботи ізолюючого стика слід розробити і впровадити прилад для вимірювання залишкової намагніченості торців рейок.

Також велика частка відмов РК доводиться на стикові з'єднувачі. В даний час розроблені і впроваджуються нові типи стикових з'єднувачів, а саме: штепсельні, пружинні, шаберно-пружинні, тарілчасті. Поряд з організаційними заходами по нормуванню параметрів стикових з'єднувачів застосування нових типів з'єднувачів дозволить знизити число відмов РК. Як альтернативних рішень слід розглянути можливість збільшення довжини зварних плітей аж до блок-ділянки або перегону.

Велика частка відмов апаратури РК доводиться на вихід з ладу через вплив зовнішніх факторів, особливо при виникненні перенапруги на входах і виходах апаратури за рахунок атмосферних явищ і деградації ізоляції від силових кіл. Розроблені і впроваджені останнім часом параметричні генератори частоти, забезпечують захист від розрядів блискавки та комутуючих процесів тягової мережі. Ці пристрої захисту дозволяють в певній мірі зняти гостроту питання, але для більш ефективного захисту потребують поліпшення стійкості РК і захисних засобів до впливу перенапруг і, природно, подальше вдосконалення елементів захисту. Зауважимо, що застосовані захисні засоби по теплових параметрах не відповідають сучасним вимогам захисту систем СЦБ при впливі атмосферних явищ.

### 1.2.1. Статистичний огляд відмов апаратури РК



Малюнок 1.3 – Розподіл відмов апаратури РК

За даними аналізу відмов апаратури РК ділянок прилеглих до станції стикування, найбільш характерними причинами є вихід з ладу дросель-трансформаторів (мал.1.3) з різних причин – підмагнічування, асиметрія, та інше, що дає можливість розмірковувати про основну причину відмови ДТ - насичення магнітопроводу.

## **РОЗДІЛ 2. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО РЕЙКОВІ КОЛА І СТАНДАРТНІ МЕТОДИ ЇХ РОЗРАХУНКУ.**

### **2.1. Устрій і принцип дії рейкових кіл**

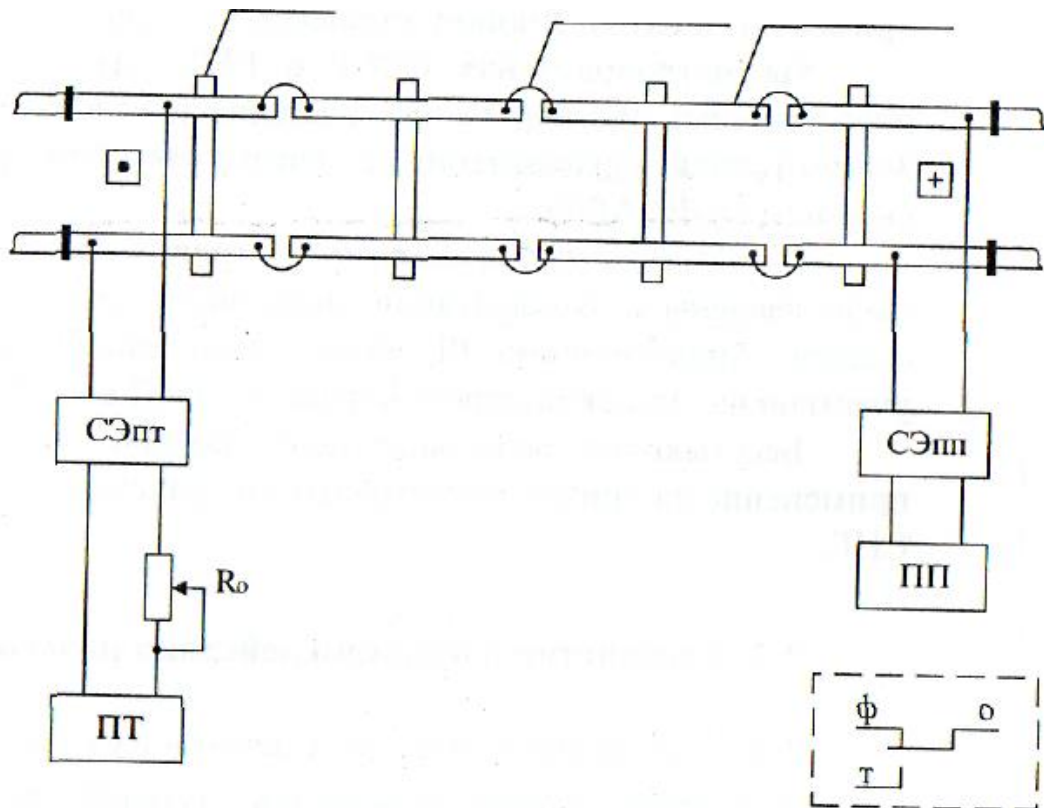
#### **2.1.1. Призначення рейкових кіл та їхня класифікація**

Рейковим колом називається колійний датчик стану залізничної колії, сприймаючим елементом якого є рейкова лінія (РЛ).

Основним призначенням РК є автоматична, безперервна видача інформації про стан РЛ у межах контрольованої ділянки колії; вільність РЛ ділянки колії й справність рейок; зайнятість РЛ ділянки колії рухомим складом (поїздом) або порушення її електричної цілісності. Ця інформація, що надходить від ряду РК, дозволяє проконтролювати місцезнаходження поїздів при їхньому русі й оцінити відстань між поїздом і перешкодою.

Рейкове коло (мал.2.1) складається з живлячого кінця, на якому підключена апаратура, призначена для живлення РК сигнальним струмом, самої рейкової лінії, використовуваної для передачі електричного струму від джерела живлення до приймача, і прийомного кінця, де підключена апаратура, необхідна для роботи приймача (колійного реле).

Рейкова лінія містить у собі рейкові нитки колії, складені з рейкових ланок. РЛ можуть бути зварені на стиках у торцях, а при відсутності зварювання - з'єднані стиковими з'єднувачами. Рейкові лінії суміжних РК ізолюють одне від одного ізолюючими стиками (ІС). У випадку використання безстикової колії лінії суміжних РК не ізолюють. Як приймачі можуть використовуватися колійні електромагнітні реле або безконтактні пристрої, а передавачі - колійні генератори або трансформатори. Розрізняють три режими роботи РК: нормальний, шунтовий і контрольний.



Малюнок 2.1 - Рейкове коло (СЭПТ і СЭПП – погоджувальні елементи між передавальним та прийомним кінцями РК;  $R_0$  - обмежник струму; ПТ - передавач струму; ПП - колійний приймач)

У нормальному режимі, коли колія в межах РК не зайнята рухомим складом, а елементи РК справні, електричний струм від передавача ПТ через обмежник  $R_0$ , і елемент, що узгоджує, СЭПТ передавального кінця РК надходить у рейкову лінію. Проходячи через РЛ і контролюючи її цілісність, цей струм попадає на прийомний кінець РК і далі, через елемент, що узгоджує, СЭПП надходить на колійний приймач (електромагнітне реле). Струм, переданий у РЛ для контролю її стану, називається сигнальним струмом РК. При проходженні сигнального струму по обмотці колійного реле його якір притягується до сердечника електромагніта, при цьому замикаються фронтіві (Ф) контакти реле, по стану яких здійснюється контроль вільності колійної ділянки, тобто приймач реалізує вихідну логічну

функцію  $f_{\Pi} = 1$  («Вільно»), що також означає й справність всіх складових елементів РК, включаючи й рейкові нитки.

В шунтовому режимі, коли на колію в межах РК вступає рухомий склад, утвориться додаткове електричне коло, у якому сигнальний струм від передавача ПТ протікає через колісні пари поїзда, при цьому РК шунтується, оскільки паралельно колійному приймачу підключається шунт - колісні пари поїзда з дуже потужним електричним опором (0,06 Ом).

Основна частина сигнального струму протікає через колісні пари, тому струм у колійному реле різко падає, що викликає розмикання фронтів (Ф) контактів колійного реле, тобто приймач реалізує вихідну логічну функцію  $f_{\Pi} = 0$  («Зайнято»).

Зниження напруги (струму) в обмотці колійного реле під дією колісних пар називається шунтовим ефектом, а колісні пари - поїзним шунтом.

Колійне реле також відпускає свій якір (розмикає фронтів контакти) не тільки при зайнятті (шунтуванні) РК, але й у випадку пошкодження рейкових ниток, коли порушується електрична цілісність ланцюга живлення колійного реле.

Властивість РК контролювати справність рейкових ниток називається чутливістю до зламу (пошкодженню) або вилученню рейки.

РК проектують й обслуговують таким чином, щоб при розриві рейкової нитки й обхідних колій, що утворилися в цьому випадку, сигнального струму через баласт, рівень струму в колійному приймачі знижувався до такого значення, при якому фіксується зайнятість РК ( $f_{\Pi} = 0$ ). Такий режим роботи РК називається контрольним.

У РК повинне контролюватися виникнення електричного замикання в ізолюючих стиках («схід стиків»): з появою такого замикання колійний приймач повинен подавати інформацію еквівалентну зайнятості РК ( $f_{\Pi} = 0$ ). Якщо РК виконують також функції телемеханічних каналів зв'язку, то перекручування електричних сигналів, що несуть інформацію, не повинно бути вище встановлених норм.

Таким чином, РК являє собою датчик, що забезпечує одержання інформації про три стани ділянки колії: ділянка колії вільна, рейки справні ( $f_{\text{п}} = 1$ ); ділянка колії зайнята рухомою одиницею ( $f_{\text{п}} = 0$ ); рейкова нитка ділянки колії обірвана ( $f_{\text{п}} = 0$ ).

Прагнення надійно забезпечити безпеку руху поїздів у конкретних умовах експлуатації при найбільш простих технічних рішеннях привело до створення різноманіття видів рейкових кіл, які класифікуються по наступним основним ознакам.

По роду сигнального струму, формованого передавачем, РК бувають постійного і змінного струму. Як правило, РК постійного струму застосовують на неелектрифікованих ділянках, де відсутнє влучення в рейки струму перешкод від сторонніх джерел. На ділянках з електричною тягою по рейкових нитках протікає зворотний тяговий струм, здатний впливати на роботу колійних приймачів. На цих ділянках застосовують РК змінного струму.

**За принципом дії РК** бувають нормально замкнутими, тобто при вільності рейкової лінії колійне реле постійно обтікається сигнальним струмом, і нормально розімкнутими. Прикладом нормально розімкнутих є гіркові РК.

**По способу ізоляції суміжних РК** розрізняють РК, обмежені ізолюючими стиками, і безстиківі рейкові кола (БРК).

**По способу пропуску зворотного тягового струму РК** розділяються на однопіткові й двопіткові. В однопіткових РК тяговий струм пропускається по одній рейковій нитці, так званої, тягової нитки. Друга рейка колії називається сигнальною ниткою. Однопіткові РК забезпечують контроль цілісності тільки сигнальної нитки й не контролюють цілісність тягової, оскільки тягові нитки сусідніх колій з'єднані міжпутньою перемичкою. У двопіткових РК тяговий струм пропускається по обох рейкових нитках. При обмеженні таких РК ізолюючими стиками для пропуску тягового струму в обхід ІС використовуються колійні дросель-трансформатори.

**По місцю розміщення апаратури РК** поділяються на: РК із централізованим розміщенням апаратури у релейних приміщеннях станцій і РК;

із розміщенням апаратури на перегоні (у тунелі) у релейних шафах (децентралізований варіант розміщення).

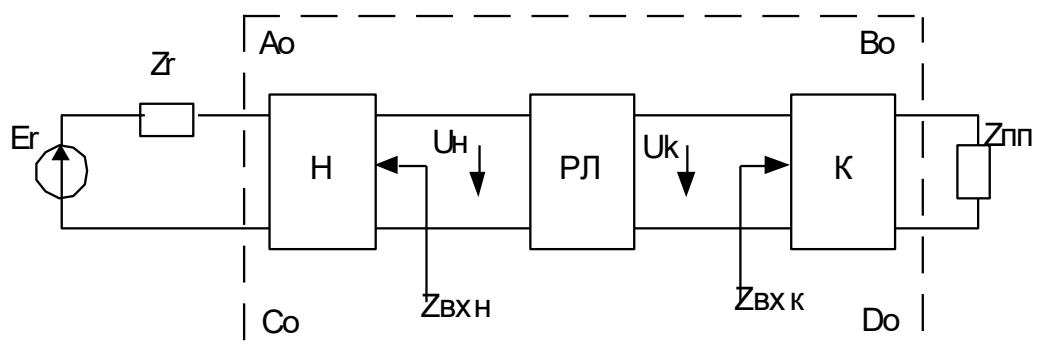
По характеру подачі сигнального струму РК виконують із безперервним й імпульсним живленням як постійного, так і змінного струму.

По способу контролю замикання ІС розрізняють РК із нейтральними, поляризованими, фазочутливими та частотними приймачами, а також з відключенням прийомних пристроїв під час передачі струму в сусідню РК.

До особливих видів РК варто віднести розгалужені РК на станціях, гіркові РК, РК контролю вільності перегону й ділянок наближення до переїздів і станцій.

### 2.1.2. Електричні параметри рейкових кіл.

Рейкове коло може бути представлене схемою заміщення (мал.2.2), на якій основні структурні частини зображені у вигляді чотиріполіусників: Н (апаратури передавального кінця), РЛ (рейкової лінії) і К (апаратури прийомного кінця), до яких підключені джерело напруги  $E_r$  і коливний приймач  $Z_{пп}$ . Для визначення напруг і струмів у різних точках ланцюга, а також для розрахунку споживаних потужностей, необхідно знати електричні параметри перерахованих елементів.



Малюнок 2.2 - Загальна схема заміщення рейкового кола

Будь-який чотиріполіусник характеризується комплексними параметрами А, В, С, D, які є коефіцієнтами рівнянь, що зв'язують входні ( $U_1, I_1$ ) і вихідні ( $U_2, I_2$ ) напруги й струми:

$$\begin{aligned} U_1 &:= A \cdot U_2 + B \cdot I_2 \\ I_1 &:= C \cdot U_2 + D \cdot I_2 \end{aligned} \quad (2.1)$$

Значення коефіцієнтів  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  визначаються внутрішньою структурою чотириполюсника. При відомих параметрах  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  можна визначити вхідні  $Z_{ВХ}$  і вихідні  $Z_{ВІХ}$  опору чотириполюсників.

РЛ є колом з розподіленими параметрами і його можна умовно представити у вигляді нескінченного числа послідовно з'єднаних елементів довжиною  $dx$  (мал.2.3). Параметрами кожного елемента є:

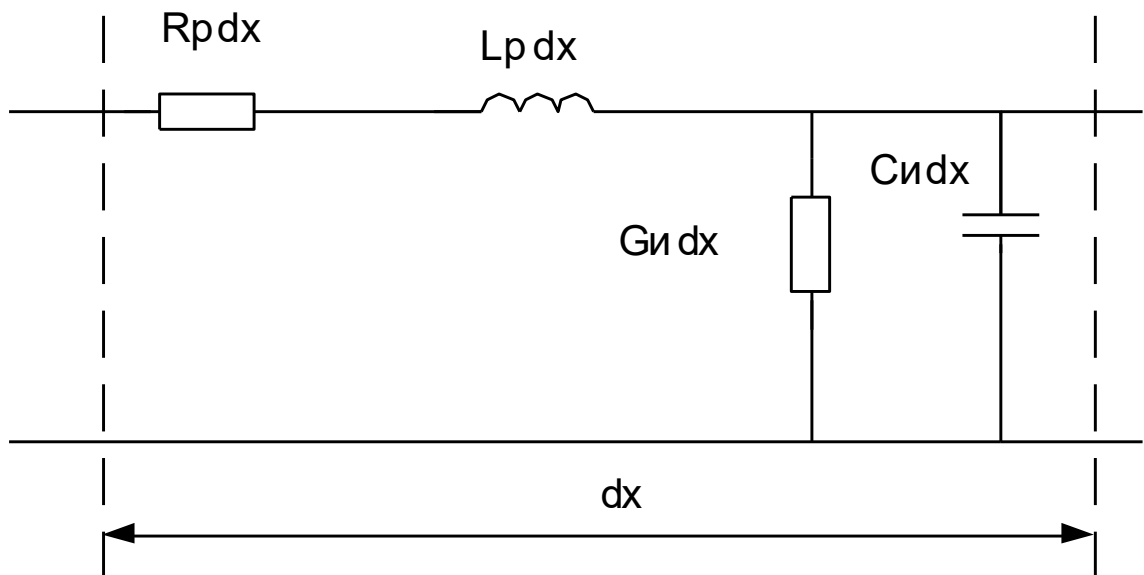
$R_p$  - кілометричний активний опір рейкової петлі, Ом/км;

$L_p$  - кілометрична індуктивність рейкової петлі, Ом/км;

$G_{и}$  - кілометрична провідність ізоляції, См/км;

$C_{и}$  - кілометрична ємність лінії, Ф/км.

Для практичних цілей замість параметра  $G_{и}$  частіше використовується зворотна величина - опір ізоляції  $R_{и} = 1/G_{и}$ , Ом\*км.



Малюнок 2.3 - Схема заміщення елемента рейкової лінії

Повний кілометричний опір рейок знаходиться як  $Z_p = R_p + j\omega L_p$ , а повна кілометрична провідність ізоляції - як  $Y_{и} = G_{и} + j\omega C_{и}$ , де  $\omega = 2\pi f$  - кругова частота сигнального струму. Параметри  $R_p$ ,  $L_p$ ,  $G_{и}$ ,  $C_{и}$ , а також  $Z_p$ ,  $Y_{и}$  називають

первинними параметрами РК. Їхні значення можуть змінюватися в широких межах залежно від конструкції й стану верхньої будови колії.

Опір рейок залежить від площі їхнього поперечного переріза, температури, виду й стану стикових з'єднувачів, рейкових накладок, а також від частоти сигнального струму (див. табл.2.1). Стикові з'єднувачі у вигляді металевих накладок, що з'єднують рейкові ланки, у процесі експлуатації не створюють стійкий електричний контакт, і тому опір рейкової лінії змінюється в значних межах. При великих значеннях опору РЛ робота РК може бути нестійкою або порушуватися.

Таблиця 2.1 - Розрахункові значення кілометричного опору рейок

Частота, Гц	25	50	75	175	420	480
Модуль опору, Ом/км	0,5	0,8	1,07	2,0	4,9	5,4
Аргумент, град/км	52	65	68	72	79	80
Частота, Гц	580	720	780	4500	5000	5500
Модуль опору, Ом/км	6,2	7,4	7,9	43,8	48,7	53,6
Аргумент, град/км	80	80,5	81	88	88	88

Нормативне розрахункове значення кілометричного опору постійного струму рейок типу Р-65 для магістральних залізниць приймається 0,2 Ом/км. Мінімальний опір рейок для РК постійного струму приймається 0,1 Ом/км.

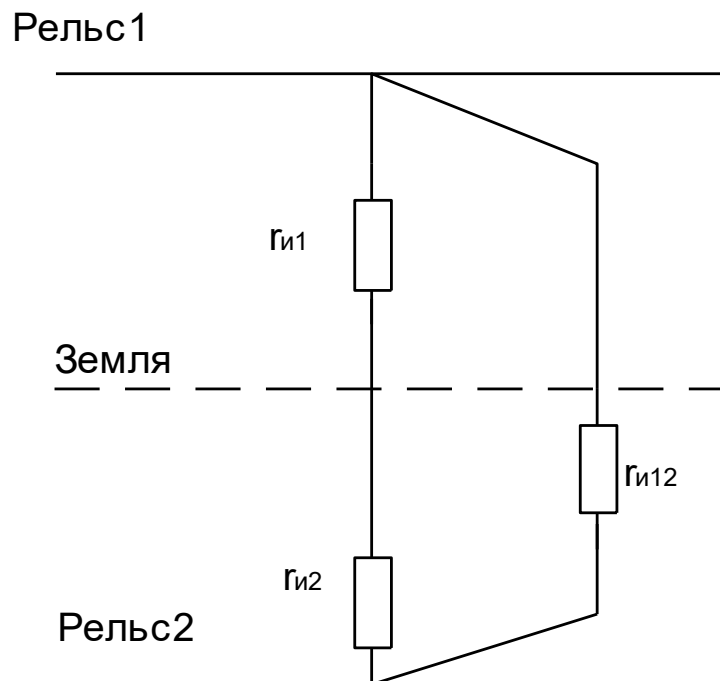
Опір ізоляції РЛ складається із часткових опорів між рейками й поверхнями шпал або ділянок баласту, а також опорів самих шпал. Цей параметр у значній мірі залежить від кліматичних факторів, а також від виду й ступеня забруднення баласту й шпал. При сухому або промерзломому баласті опір ізоляції становить 20-50 Ом\*км і більше, при мокрому баласті воно може опускатися до 0,5-1,0 Ом\*км, а на особливо несприятливих ділянках - до часток (0,05-0,1) Ом\*км.

Найкращим матеріалом для баластового шару є щебінь; інші баластові матеріали (гравій, черепашник) створюють менший електричний опір, чим щебінь; найбільш низький опір ізоляції спостерігається при піщаному баласті.

Еквівалентна схема заміщення опору ізоляції РЛ представлена на мал.1.4. Опору  $r_{и1}$  і  $r_{и2}$  характеризують перехідні опори між кожною рейкою й землею, а опір  $r_{и2}$  характеризує частина струму витоку, що проходить безпосередньо з рейки в рейку по верхньому шару баласту й шпал. Співвідношення між цими складовими опору ізоляції виражає коефіцієнт поверхневої провідності

$$m = r_{и1} / r_{и2} \quad (2.2)$$

Значення цього коефіцієнта залежить від виду баласту й шпал (див. табл.2.2). При аналізі контрольного режиму з розрахунку найгірших умов приймають  $m = 0$  (відсутність витоку струму по шпалах).



Малюнок 2.4 – Схема заміщення елемента ізоляції рейкової лінії

Таблиця 2.2 - Значення коефіцієнта поверхневої провідності

Вид шпал	Вид баласту	m
----------	-------------	---

Дерев'яні	Щебневий	1,8
Дерев'яні	Піщаний	3,2
Залізобетонні	Щебневий	9,1

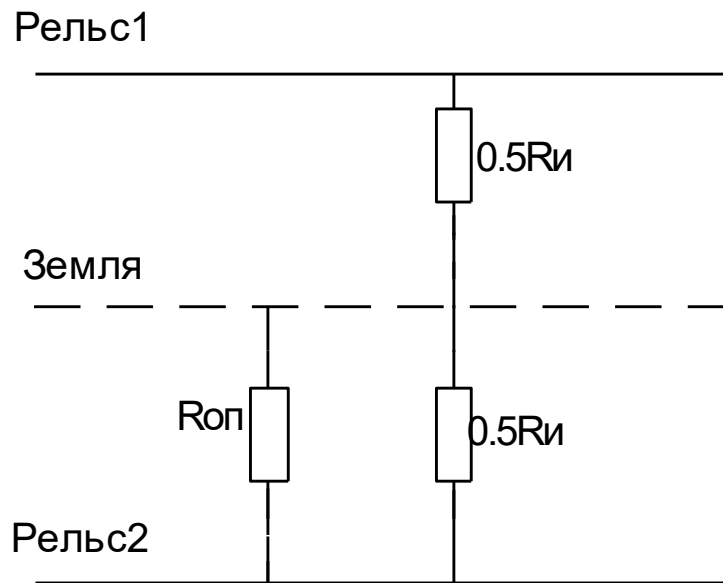
Наявність витоку струму по поверхні баласту й шпалам приводить до того, що при розриві рейкової нитки безперервність електричного кола не порушується, і за певних умов це може привести до невиконання контрольного режиму.

Розрахунковий мінімальний питомий опір ізоляції РЛ для магістрального залізничного транспорту прийнято: для двониткових РК – 1 Ом\*км, однострижкових і розгалужених - 0,5 Ом\*км; для ліній метрополітену – 2 Ом\*км. Для нормально розімкнутих гіркових РК встановлено мінімальний опір ізоляції 3 Ом\*км. ТРК частоти можуть розраховуватися для більш низьких опорів ізоляції – до 0,1 Ом\*км.

На ділянках з електротягою, за умовами техніки безпеки, опори контактної мережі заземлюються на одну з рейок (мал.2.5). При цьому еквівалентний опір ізоляції обчислюється по формулі

$$R_{OP\min} = 0,5 \cdot R_{OP} + \frac{0,5 \cdot R_{II} \cdot R_{OP}}{0,5 \cdot R_{II} + R_{OP}} \quad (2.3)$$

де  $R_{OP\min}$  - кілометричний опір заземлення опору. Мінімальний опір заземлення опор приймається рівним 2 Ом\*км.



Малюнок 2.5 - Схема заземлення опор контактної мережі

### 2.1.3. Параметри колійних приймачів

Колійний приймач є вихідним елементом РК і виконує відповідальну функцію - забезпечення безпеки руху поїздів. Тому колійні приймачі повинні мати високу надійність, мати захист від електромагнітних полів і перешкод тягового струму; бути простими по будові, доступними для профілактичного огляду й ремонту.

Колійні приймачі, використовувані в різних типах РК, підрозділяються на контактні та безконтактні. Колійний приймач є останньою ланкою в ланцюзі забезпечення безпеки руху поїздів, від його правильної й чіткої роботи залежать життя людей і схоронність вантажів, перевезених залізничним транспортом.

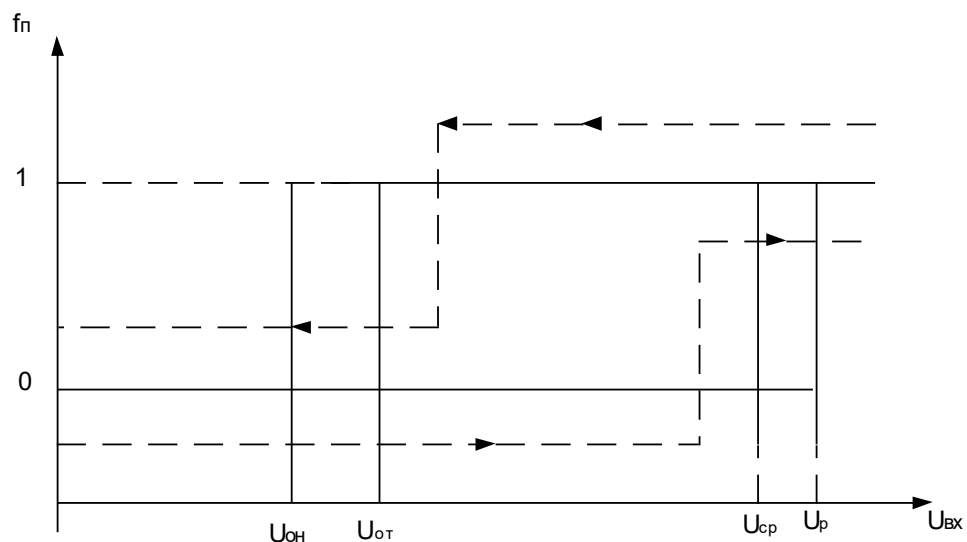
Приймач РК має граничний елемент релейної дії й може приймати два стани: робоче (під струмом) і виключене (без струму).

У робочому стані, при якому видається інформація «вільно», колійний приймач перебуває тоді, коли рівень сигналу на його вході перевищує деяке значення, назване порогом спрацьовування. Граничні релейні елементи можуть бути електронними й електромеханічними (реле).

В електромеханічному реле порогом спрацьовування колійного приймача є напруга на його обмотці, при якій забезпечується притягання якоря реле й замикання його фронтів контактів.

У вимкненому стані, при якому видається інформація «зайнято», приймач перебуває тоді, коли сигнал на його вході менше деякого значення, що називається порогом відключення приймача. У РК із колійними електромагнітними реле поріг відключення являє собою напругу на обмотці, при якому колійне реле відпускає якір і розмикає фронтів (Ф) контакти.

Якщо позначити вихідну логічну функцію, реалізовану колійним приймачем,  $f_{\Pi}$ , то  $f_{\Pi} = 1$  («вільно»), коли замкнуті фронтів контакти, і  $f_{\Pi} = 0$  («зайнято»), коли фронтів контакти розімкнуті. На мал.2.6 наведена залежність значень функції  $f_{\Pi}$  від рівня сигналу на вході колійного приймача  $U_{ВХ}$ . Є два граничних значення вхідного сигналу, при яких приймач перемикається з одного стану в інше. Якщо приймач виключений, то для його переходу в робочий стан необхідно збільшення вхідного сигналу до напруги спрацьовування  $U_{сп}$ , приймач повертається з робочого стану у виключене при напрузі відпускання  $U_{от}$ , що завжди менше  $U_{сп}$ . Різниця  $U_{сп} - U_{от}$  залежить від типу приймача: чим вона менше, тим краще приймач. Напругу  $U_{сп}$  й  $U_{от}$  вказують у технічних даних на реле.



Малюнок 2.6 - Статична характеристика колійного приймача

Для надійної роботи приймача необхідно забезпечити рівень сигналу на вході приймача трохи вище, ніж напруга  $U_{cp}$ , з метою забезпечення запасу на спрацьовування приймача. Напруга спрацьовування з урахуванням запасу  $U_p$  називають робочою, або напругою надійного спрацьовування:  $U_p = U_{зcp} - U_{cp}$ .

Коефіцієнт запасу на спрацьовування приймача  $K_{зс} = U_p / U_{cp} > 1$ . Коефіцієнт запасу вибирають таким, щоб забезпечити необхідні тимчасові характеристики приймача з урахуванням впливу дестабілізуючих факторів.

Звичайно для контактних приймачів  $K_{зср} = 1,1 - 1,5$ , а для безконтактних  $K_{зср} = 1,05 - 1,20$ .

Коефіцієнт повернення колійного приймача  $K_v = U_{от} / U_{cp}$  залежить від типу приймача, але завжди  $K_v < 1$ . Чим більше коефіцієнт повернення, тим краще колійний приймач.

У контактних приймачів  $K_v = 0,3 - 0,6$ , а в безконтактних  $K_v = 0,8 - 0,95$ . Для надійного повернення приймача у вихідний стан ( $f_{п} = 0$ ) напруга на вході приймача повинна бути трохи нижче напруги відпускання  $U_{от}$  з метою забезпечення запасу на відключення приймача. Напруга відпускання приймача з урахуванням запасу на відключення називається напругою надійного відпускання  $U_{он} = K_{з0} \cdot U_{от}$ . Коефіцієнт запасу на відключення приймача завжди менше 1. Його вибирають залежно від типу приймача таким, щоб забезпечувалося надійне одержання інформації «зайнято» ( $f_{п} = 0$ )  $K_{з0} = U_{он} / U_{от} < 1$ .

Для електромагнітних реле, що виконують функцію колійного приймача, прийнято  $K_{з0} = 0,6$ , індукційних секторних - 0,85, а для імпульсних колійних реле  $K_{з0} = 0,7$ .

Коефіцієнт надійного повернення колійного приймача  $K_{вн} = U_{он} / U_p$ .

#### 2.1.4. Основні режими роботи рейкових кіл .

Головною особливістю РК є те, що вони забезпечують інформацію про стан рейкової лінії, працюючи при цьому в декількох режимах - нормальному,

шунтовому й контрольному. За умовами режиму АЛС при шунтуванні поїздом РЛ, струм АЛС у рейках під прийомними котушками повинен бути не нижче нормативного, обумовленого чутливістю приймачів локомотивних пристроїв АЛС і вимогами захисту від перешкод.

На умови роботи РК у кожному з режимів впливають три незалежних параметри: опір рейок, опір ізоляції й напруга джерела живлення. Найбільш важкі (критичні) умови для кожного режиму створюються при різних сполученнях цих параметрів. Характер впливу зазначених факторів на різні режими роботи РК також залежить від її довжини, схеми й параметрів апаратури.

Для забезпечення нормального режиму роботи РК найбільш несприятливими є такі значення параметрів, при яких струм у колійному реле виходить мінімальним. Це спостерігається при максимальному опорі рейок, мініимальному опорі ізоляції й мініимальному значенні напруги джерела живлення. Те ж справедливо й для режиму АЛС.

Для шунтового режиму несприятливі такі значення параметрів РК, при яких струм у колійному реле виходить максимальним і шунтуючий вплив колісних пар слабшає: мініимальний опір рейок, максимальний опір ізоляції й максимальна напруга джерела живлення.

При пошкодженні (обриві) рейки не відбувається повного електричного розриву рейкової нитки внаслідок витoku сигнального струму через баласт, в обхід місця обриву. Значення сигнального струму, що протікає через колійне реле в контрольному режимі, залежить від значення опоры ізоляції. Критичним опором ізоляції називається опір, при якому струм у колійному реле максимальний. Воно залежить від місця пошкодження РЛ й по-різному для кожної РК. Найгіршими умовами для виконання контрольного режиму, при яких струм у колійному реле максимальний, є: мініимальний опір рейкової лінії, критичний опір ізоляції, максимальна напруга джерела живлення.

Робота РК, на ділянках з електротягою, ускладнюється протіканням у рейках зворотного тягового струму, що створює перешкоди, які можуть

порушити нормальну роботу РК. По міжколіїним з'єднанням для пропуску тягового струму утворюються обхідні колії сигнальному струму РК, що погіршує умови їхньої роботи, насамперед у контрольному режимі.

Критичні несприятливі умови, по яких повинен вироблятися розрахунок нормального функціонування РК в основних режимах, наведені в табл.2.3.

Таблиця 2.3 - Критичні умови режимів роботи РК

Режим роботи РК	Несприятливі значення параметрів		
	Опір рейок	Опір ізоляції	Напруга джерела живлення
Нормальний й АЛС	Максимальне	Мінімальне	Мінімальне
Шунтовий	Мінімальне	Максимальне	Максимальне
Контрольний	Мінімальне	Критичне (визначається розрахунком)	Максимальне

Роботу РК у нормальному, шунтовому і контрольному режимах кількісно оцінюють за допомогою критеріїв: коефіцієнта перевантаження  $K_{пер}$ , коефіцієнта чутливості до нормативного шунта  $K_{шн}$  і коефіцієнта чутливості РК до обірвагої (ушкодженої) нитки  $K_{кп}$ .

Основною характеристикою роботи РК у нормальному режимі є коефіцієнт перевантаження  $K_{пер}$ , що представляє собою відношення фактичного значення сигналу на вході колійного приймача ( $U_{вх}$ ) до робочого значення:  $K_{пер} = U_{вх} / U_p$ .

Необхідна напруга на вході колійного приймача в РК забезпечується зміною вихідної напруги джерела живлення. Для одержання робочої напруги на вході колійного приймача при найгірших для нормального режиму умовах

необхідно, щоб напруга живлення РК дорівнювала  $U_{\min}$ . Отже, для виконання нормального режиму РК потрібно, щоб фактична напруга живлення була більша або дорівнювала  $U_{\min}$ .

Надійність роботи РК у шунтовому режимі характеризується абсолютною шунтовою чутливістю й коефіцієнтом чутливості до нормативного поїзного шунта.

Абсолютна шунтова чутливість  $R_{\text{ш}}$  являє собою опір поїзного шунта, при якому напруга на вході колійного приймача зменшується до напруги надійного повернення при найгірших умовах шунтового режиму. Чим вище абсолютна шунтова чутливість РК, тим краще забезпечується шунтовий режим.

Рейкові кола повинні мати абсолютну шунтову чутливість не менш 0,06 Ом, названу нормативною.

Опір колісних пар має індуктивну складову, а перехідний опір у діапазоні частот від 0 до 10 кГц - активну складову, що не залежить у зазначеному діапазоні від частоти. Так як перехідний опір активний та більше опору колісних пар, то в розрахунках опір поїзного шунта приймається активним.

Коефіцієнт чутливості до нормативного поїзного шунта  $K_{\text{шн}}$  - це відношення напруги надійного відпускання  $U_{\text{он}}$  колійного приймача до фактичної напруги на його вході  $U_{\text{ш}}$  при накладеному на РК шунті опором 0,06 Ом у найгірших умовах для шунтового режиму, тобто  $K_{\text{шн}} = U_{\text{он}} / U_{\text{ш}}$ . Шунтовий режим виконується, якщо  $K_{\text{ш}} > K_{\text{шн}} = 0,06 \text{ Ом}$ , або  $K_{\text{шн}} > 1$ .

Напруга на вході колійного приймача при накладенні нормативного шунта в умовах, найгірших для шунтового режиму, дорівнює напрузі надійного відпускання  $U_{\text{он}}$ , якщо напруга живлення РК дорівнює певній напрузі  $U_{\text{дш}}$ , (максимально припустимому). Якщо фактична напруга живлення  $U_{\text{ф}}$  буде більше  $U_{\text{дш}}$ , то напруга на вході приймача  $U_{\text{ршф}}$  перевищить значення  $U_{\text{вн}}$ .

Таким чином,  $U_{\text{дш}}$  - припустима (максимальна) напруга живлення РК в шунтовому режимі.

Для виконання шунтового режиму потрібно, щоб

$$U_{\phi} < U_{дш}; K_{шн} = U_{дш}/U_{\phi}$$

Шунтовий ефект залежить від місця розташування шунта на рейковій лінії. Місцем мінімальної шунтової чутливості, або критичним місцем шунтової чутливості називається місце РЛ, при накладенні в якому поїзного шунта шунтовий ефект проявляється найбільш слабо. Однією з найгірших умов шунтового режиму є розташування шунта в місці мінімальної шунтової чутливості.

Роботу РК у контрольному режимі характеризує коефіцієнт чутливості до обірваної (ушкодженої) нитки  $K_{кп}$ . Він являє собою відношення напруги надійного відпускання колійного приймача  $U_{он}$  до фактичної напруги приймача  $U_{к}$  у контрольному режимі при критичному опорі ізоляції й критичному місці обриву:  $K_{кп} = U_{он} / U_{к}$ . Контрольний режим виконується, якщо  $K_{кп} > 1$ .

Для одержання напруги надійного повернення на вході приймача при найгірших для контрольного режиму умовах необхідно, щоб напруга живлення РК була рівною певній (максимально припустимій) нарузі  $U_{дкп}$ . Для забезпечення контрольного режиму потрібно, щоб фактична напруга живлення  $U_{\phi}$  була менше або дорівнювала  $U_{дкп}$ , тобто

$$U_{\phi} < U_{дкп} \text{ або } K_{кп} = U_{дкп} / U_{\phi}.$$

Критерії  $K_{пер}$ ,  $K_{шн}$  і  $K_{кп}$  використовують при розрахунках РК із обліком найбільш несприятливого сполучення параметрів елементів апаратури й рейкової лінії в кожному з розрахункових режимів. Такі розрахунки називають детермінованими. При такому методі розрахунку РК напруга джерела живлення встановлюють таким, що всі режими роботи виконуються у всьому діапазоні зміни опору ізоляції рейкової лінії від розрахункового  $r_{ир}$  (мінімального по технічних умовах) нескінченно. Якщо фактичний опір ізоляції  $r_{иф}$  РЛ під час експлуатації виявиться менше ніж  $r_{ир}$ , то співвідношення  $K_{пер} > 1$ , а отже у нормальному режимі не будуть виконуватися, тобто при відхиленні всіх параметрів елементів схеми РК від номінального значення в несприятливу сторону напруга на вході колійного приймача буде менше розрахункової  $U_{р}$ .

У дійсності такий набір параметрів елементів буде зустрічатися не у всіх РК. У тих РК, у яких значення параметрів елементів будуть близькі до номінального або будуть відхилятися в таку сторону, що будуть сприяти збільшенню напруги на приймачі, нормальний режим буде виконуватися й при більше низькому опорі ізоляції рейкової лінії, чим це виходить на підставі детермінованого розрахунку. Крім того, напруга спрацьовування в різних колійних приймачів того самого типу не однакові й перебувають у діапазоні від  $U_{пп \text{ min}}$  до  $U_{пп \text{ max}}$ . При детермінованому розрахунку приймається максимальна напруга, по технічних умовах припустиме для колійних приймачів розглянутого типу,  $U_p = U_{пп \text{ max}}$ . Тому можливо випадок, коли при несприятливому наборі всіх параметрів елементів схеми РК напруга спрацьовування реального приймача виявиться рівною  $U_{пп \text{ min}}$  і робота в нормальному режимі не порушиться.

Таким чином, при  $R_{иф} < R_{ир}$  нормальний режим РК може виконуватися, а може й не виконуватися залежно від того, яким випадковим образом параметри колійного приймача й елементів схеми РК відхиляться від номінальних значень. Очевидно, що чим менше  $R_{иф}$  у порівнянні з  $R_{ир}$ , тим менше ймовірність виконання нормального режиму.

Електричні характеристики й параметри РК використовують при аналізі схем, розрахунках режимів роботи й складанні регулювальних таблиць.

## **2.2. Основи розрахунку й аналізу рейкових кіл.**

### **2.2.1. Завдання, розв'язувані при розрахунку й аналізі.**

Метою розрахунку РК є визначення номінальних параметрів джерела живлення, при яких забезпечується усталена робота РК у всіх режимах. При розрахунку повинні бути відомі схема РК, а також діапазони зміни умов її функціонування, наприклад, стану ізоляції РЛ, межі коливань напруги живлення, можливий розкид параметрів елементів. У процесі розрахунку визначають потужність джерела живлення, а також параметри живлячих кабелів.

Аналіз РК складається в дослідженні змін їхньої роботи в різних режимах при зміні параметрів схеми. У ході аналізу визначають оптимальні значення параметрів елементів схеми й частоти джерела живлення для заданих умов функціонування.

При аналізі й розрахунку РК передбачається, що рейкова лінія й елементи апаратур є лінійними, тобто їхні параметри не залежать від струмів, що протікають. Для спрощення розрахунків РК представляють відповідною математичною моделлю (схемою заміщення) для кожного режиму. Залежно від виду застосовуваної схеми заміщення розрізняють чотирьохполюсні й багатопольосні моделі. Класичний метод розрахунку заснований на використанні чотирьохполюсних моделей. Одна з таких моделей, що відбиває роботу РК у нормальному режимі, представлена на мал.2.2.

### **2.2.2. Способи одержання вихідних даних для аналізу й розрахунку**

Для виконання розрахунків необхідно розташовувати параметрами генератора й приймача, а також значеннями коефіцієнтів чотирьохполюсників, що входять у тракт передачі сигналу. Вихідні дані, необхідні при розрахунку РК, що працюють на низьких частотах сигнального струму 25 й 50 Гц, приводяться в довідковій літературі. Для тональних РК такі дані в більшості випадків відсутні. Тому доцільно розглянути загальну методику експериментального й розрахункового визначення параметрів, що цікавлять, апаратуру й елементи РК.

#### **2.2.2.1. Параметри генераторів**

Параметрами генератора (активного двополюсника) є ЕДС ( $E$ ) еквівалентного генератора і його внутрішній опір  $z = R_z + j\omega X_z$ , де  $R_z$  й  $X_z$  - активна й реактивна складові.

ЕДС еквівалентного генератора визначається як вихідна напруга із частотою  $f$  у режимі холостого ходу, а внутрішній опір — як відношення цієї напруги до струму короткого замикання. Для практичних цілей такий метод

знаходження внутрішнього опору звичайно неприйнятний, тому що не для всякого активного двополюсника допускається режим короткого замикання. Тому доцільно визначати внутрішній опір методом варіації навантажень, що припускає вимір ЕДС, як вихідної напруги в режимі холостого ходу, і наступний розрахунок невідомих параметрів на підставі результатів виміру напруги  $U_i$  на виході активного двополюсника при підключенні до нього різних навантажень  $Z_{ni}$ .

У найпростішому випадку, коли потрібно визначити модуль внутрішнього опору генератора без обліку його реактивності, як відоме навантаження використовується активний опір  $R$ . Тоді

$$|Z| = \left( \frac{E}{U_R} - 1 \right) \cdot R \quad (2.4)$$

де  $U_R$  - напруга на навантаженні.

Для підвищення правильності результатів варто вибирати значення  $R$  мінімально можливим, при якому генератор зберігає номінальні характеристики.

Описаний спосіб застосуємо в тих випадках, коли внутрішній опір генератора має активний характер і  $|Z| = R_z$ . У загальному випадку, коли потрібно визначити внутрішній опір з урахуванням його реактивності, як відомі навантаження необхідно використати елементи як з активним, так і з реактивним характером опору. Для знаходження двох невідомих  $R_z$  і  $X_z$  число по черзі навантажень, що підключають, повинне бути не менш двох. За результатами виміру напруг складається система рівнянь, що вирішується щодо невідомих  $R_z$  і  $X_z$ .

Наприклад, якщо як відомі навантаження використані конденсатори з відомими ємностями  $C_i$  рівняння системи мають вигляд

$$R_z = \sqrt{\left( \frac{E}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_i \cdot U_i} \right)^2 - \left( X_z - \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_i} \right)^2} \quad (2.5)$$

Якщо як навантаження додатково використовуються також активні опори  $R_j$ , система доповнюється рівняннями

$$X_Z = \sqrt{\left(\frac{E \cdot R_j}{U_j}\right)^2 - (R_Z + R_j)^2} \quad (2.6)$$

Для забезпечення правильності отриманих результатів необхідно використати такі значення навантажень, при яких вихідні струми двополюсника перебувають у припустимих межах, а сам двополюсник зберігає особливість лінійності.

### 2.2.2.2. Параметри приймачів

Параметром колійного приймача як пасивного двополюсника є частотно-залежний комплексний вхідний опір  $Z = |Z| \cdot \exp(j\phi)$ , де  $|Z|$  і  $\phi$  - модуль й аргумент.

Для виміру складових комплексного опору використовуються методи зрівноважування (із застосуванням мостів змінного струму або побудовані на основі резонансних явищ), методи прямого перетворення, а також непрямі методи.

При використанні методу вольтметра-амперметра до входу двополюсника підключається джерело напруги із частотою  $f$  і виробляється вимір напруги  $U$  і струму  $I$  досліджуваної схеми, при цьому модуль вхідного опору  $|Z| = U/I$ .

Для визначення аргументу використовується фазометр або ватметр. При використанні фазометра шуканий аргумент  $\phi$  визначається безпосередньо. При використанні ватметра спочатку визначається активна потужність  $P = U \cdot I \cdot \cos(\phi)$ , а значення аргументу перебуває зі співвідношення  $\phi = \pm \arccos(P/UI)$ . Знак аргументу уточнюється шляхом підключення паралельно до входу двополюсника додаткової ємності: при цьому зростання струму в ланцюзі свідчить про негативний знак аргументу, а зменшення струму - про позитивний.

Значення струму в ланцюзі може визначатися непрямим шляхом через спадання напруги на додатковому активному опорі.

При використанні методу трьох вольтметрів послідовно із двополюсником включається додатковий елемент із відомим опором  $Z_d$ . До входу схеми підключається джерело напруги із частотою  $f$  і виробляється вимір трьох напруг:  $U_1$  - на вході схеми,  $U_2$  — на додатковому елементі та  $U_3$  - на вході двополюсника. При використанні як додатковий елемент відомої ємності  $C_d$ , модуль й аргумент вхідного опору визначаються з виразів

$$|Z| = \frac{U_3}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_d \cdot U_2}$$

$$\phi = \arcsin \left[ \frac{(U_2)^2 + (U_3)^2 - (U_1)^2}{2 \cdot U_2 \cdot U_3} \right] \quad (2.7)$$

Якщо характер реактивності відомий заздалегідь, то замість додаткової ємності підключається резистор  $R_d$  і виконуються аналогічні виміри напруг, після чого модуль й аргумент вхідного опору визначаються з виразів

$$|Z| = \frac{U_3 \cdot R_d}{U_2}$$

$$\phi = \arccos \left[ \frac{(U_1)^2 - (U_2)^2 - (U_3)^2}{2 \cdot U_2 \cdot U_3} \right] \quad (2.8)$$

а знак «+» або «-» визначається виходячи з очікуваного характеру реактивності.

Застосовувані в тональних РК колійні приймачі типу ПП мають на робочій частоті практично активний вхідний опір у межах від 140 до 160 Ом. При зміні частоти модуль вхідного опору зменшується, а аргумент змінюється до  $\pm 90$  залежно від зменшення або збільшення частоти в порівнянні з робочою.

### 2.2.2.3. Параметри прохідних чотиріполюсників апаратури

Параметрами пасивного прохідного чотиріполюсника є комплексні коефіцієнти А, В, С и D, що задовольняють системі рівнянь

$$\begin{aligned} U_1 &:= A \cdot U_2 + B \cdot I_2 \\ I_1 &:= C \cdot U_2 + D \cdot I_2 \end{aligned} \quad (2.9)$$

де  $U_1$ ,  $I_1$ ,  $U_2$ ,  $I_2$  - напруги й струми відповідно на вході й на виході чотириполюсника.

Коефіцієнти чотириполюсника можуть бути отримані експериментальним або розрахунковим шляхом.

Для експериментального визначення шуканих коефіцієнтів необхідно в загальному випадку виконати вимір не менш чотирьох векторних величин. Знаходження параметрів чотириполюсника за результатами вимірів всіх напруг і струмів, а також фазових зсувів між ними, практично важко, тому в основному застосовуються спрощені методи, засновані на розрахунку коефіцієнтів за результатами вимірів вхідних опорів чотириполюсника в різних режимах.

Найбільш просто реалізуються режими холостого ходу й короткого замикання. Якщо відомі вхідні опори чотириполюсника в цих режимах, то шукані коефіцієнти перебувають зі співвідношень

$$\begin{aligned} A &= \sqrt{\frac{Z_{1XX} \cdot Z_{1K3}}{Z_{2K3} \cdot (Z_{1XX} - Z_{1K3})}} \\ B &= A \cdot Z_{2K3} \\ C &= \frac{A}{Z_{1XX}} \\ D &= \frac{B}{Z_{1K3}} \end{aligned} \quad (2.10)$$

де  $Z_{1XX}$ ,  $Z_{1K3}$  - вхідні опори в режимах холостого ходу й короткого замикання, обмірювані з боку вхідних затисків;  $Z_{2XX}$  й  $Z_{2K3}$  теж з боку вихідних затисків.

При вимірі вхідних опорів таких чотириполюсників, як трансформатори або дроселі-трансформатори, необхідно правильно встановлювати параметри іспитових впливів (напруг і струмів), для забезпечення відповідності магнітних потоків у сердечнику при кожному вимірі.

З метою одержання значень коефіцієнтів  $A$ ,  $B$ ,  $C$  та  $D$  у першому наближенні можна скористатися спрощеною методикою, що не вимагає виміру вхідних опорів, а в основі якої лежить вимір напруг і різниць фаз між ними. Спочатку до вхідних затисків чотириполюсника підключається джерело напруги із частотою  $f$  і встановлюється режим холостого ходу на виході. За результатами виміру вхідної  $U_1$ , і вихідної  $U_2$  напруги розраховують коефіцієнт  $A = U_1 / U_2$ .

Після виміру вхідного струму  $I_1$ , визначається коефіцієнт  $C = I_1 / U_2$  (значення струму може визначатися непрямым шляхом, по вимірі напруги на відомому активному опорі).

Потім до виходу чотириполюсника підключається відомий опір  $R$  і виміряються нові значення напруг  $U_{1-1}$  й  $U_{2-1}$ . З обліком раніше отриманих результатів, коефіцієнт  $B = (U_{1-1} / U_{2-1} - A) \cdot R$ . Значення опору  $R$ , що підключається, уточняється в процесі підбору.

Після виміру нового значення вхідного струму  $I_{1-1}$  визначається коефіцієнт  $D = (I_{1-1} / U_{2-1} - C) \cdot R$ .

При знаходженні коефіцієнтів варто мати на увазі, що в симетричних чотириполюсників  $A = B$ , а в трансформаторів  $A = 1/D$ , що можна використати для додаткової перевірки.

Для визначення коефіцієнтів чотириполюсника шляхом розрахунку необхідно розташовувати принциповою схемою кола й параметрами його елементів. Схема розчленовується на елементарні чотириполюсники (див. табл. 1.4) і виробляється перемноження їхніх матриць, за результатами якого перебувають коефіцієнти  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ .

#### 2.2.2.4. Параметри рейкової лінії

Коефіцієнти чотириполосника РЛ у нормальному режимі виражаються формулами

$$\begin{aligned} A = D &= \text{ch} (\gamma \cdot l) \\ B &= Z_v \cdot \text{sh} (\gamma \cdot l) \\ C &= \frac{\text{sh} (\gamma \cdot l)}{Z_v} \end{aligned} \quad (2.11)$$

де  $\gamma$  - постійна поширення рейкового тракту;

$l$  - довжина лінії;

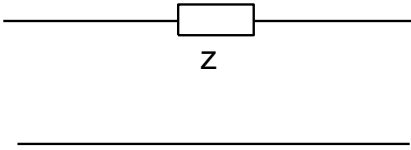
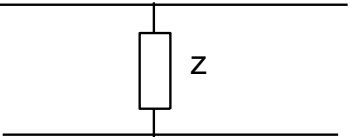
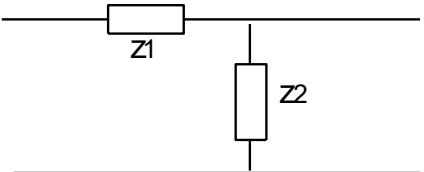
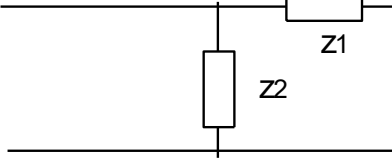
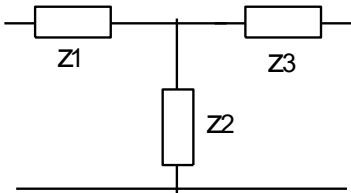
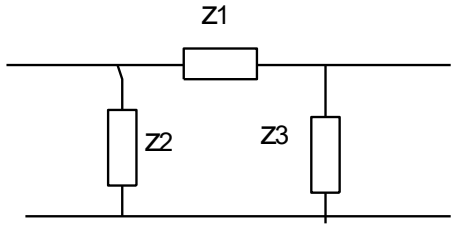
$Z_v$  - хвильовий опір.

Хвильові параметри РЛ визначаються виразами

$$\begin{aligned} Z_v &= \sqrt{z_p \cdot r_H} \\ \gamma &= \sqrt{\frac{z_p}{r_H}} \end{aligned} \quad (2.12)$$

де  $z_p$  й  $r_H$  кілометричний опір рейок та ізоляції.

Таблиця 2.4 – Матриці елементарних чотириполюсників

	$\begin{matrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{matrix}$
	$\begin{matrix} 1 & 0 \\ 1/Z & 1 \end{matrix}$
	$\begin{matrix} 1+Z1/Z2 & Z1 \\ 1/Z2 & 1 \end{matrix}$
	$\begin{matrix} 1 & Z1 \\ 1/Z2 & 1+Z1/Z2 \end{matrix}$
	$\begin{matrix} 1+Z1/Z2 & Z1+Z3+Z1Z1/Z2 \\ 1/Z2 & 1+Z3/Z2 \end{matrix}$
	$\begin{matrix} 1+Z1/Z3 & Z1 \\ 1/Z2+1/Z3+Z1/Z2Z3 & 1+Z1/Z2 \end{matrix}$

Коефіцієнти рейкового чотириполюсника можуть бути знайдені експериментальним шляхом. Для цього необхідно виконати багаторазові й досить складні виміри реальних РЛ у різноманітних умовах експлуатації. Для

забезпечення вірогідності результатів потрібно усувати вплив тягових і блукаючих струмів, відключати заземлення й дросель-трансформатори, що на практиці складно забезпечити. Тому більш простим рішенням завдання є розрахункове визначення параметрів рейкового чотириполюсника. Експериментальна перевірка показує, що точність одержуваних результатів цілком достатня для практичних цілей .

Опір рейок має активно-індуктивний характер і складається із частотно-залежного активного опору рейкових ниток та індуктивною складовою, обумовленою внутрішньою індуктивністю рейкових ниток, їхньою взаємною індуктивністю і зовнішньою індуктивністю рейкової петлі. При визначенні еквівалентного опору рейок також враховують активні та індуктивні опори стикових з'єднувачів.

Електричні параметри рейок у загальному випадку залежать від величини струму, що протікає по них, що зменшує магнітну проникність рейкової сталі й знижує внутрішню індуктивність рейкових ниток. Однак у практичних розрахунках цією обставиною можна знехтувати.

Загальний кілометричний опір рейок визначається виразом

$$Z_P = 2 \cdot (R_a + N_c R_c) + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad (2.13)$$

де  $R_a$  - активний опір 1 км рейкової нитки;

$N_c$  - число стикових з'єднувачів на 1 км;

$R_c = 0.0003$  Ом - активний опір стикового з'єднувача;

$f$  - частота сигнального струму;

$L$  - кілометрична індуктивність рейок.

Кілометричний активний опір рейкової нитки складається із двох складових: опору постійному струму  $R_a$  й опору змінному струму  $R_a$ . Перша складова

$$R_a = R_{20} (1 + \alpha (t - 20)) \quad (2.14)$$

де  $R_{20}$  - кілометричний опір при температурі  $+20^\circ\text{C}$ ;

$a$  - температурний коефіцієнт опору, для рейкової сталі становить 0,0461 1/град;  
 $t$  - температура рейки, град.

Активний кілометричний опір рейкової нитки змінному струму визначається виразом

$$R_a = \frac{2.8 \cdot \sqrt{\mu \cdot \rho \cdot f}}{u} \quad (2.15)$$

де  $\mu = 100$  - відносна магнітна проникність рейкової сталі;  
 $\rho = 0,21 \cdot 0,000001$  Ом • м - питомий опір рейкової сталі;  
 $u$  - периметр поперечного переріза рейки.

Повна кілометрична індуктивність рейкової петлі

$$L = L_e + 2 \cdot (L_i + N_c \cdot L_c) \quad (2.16)$$

де  $L_e$  - повна зовнішня індуктивність рейкової петлі довжиною 1 км;

$L_i$  - внутрішня індуктивність рейкової нитки довжиною 1 км;

$L_c$  - індуктивність стикового з'єднувача (для приварних з'єднувачів становить  $1,27 \cdot 10^{-6}$  Гн).

Повна зовнішня індуктивність рейкової петлі довжиною 1 км

$$L_e = 2(L_e - M) \quad (2.17)$$

де  $L_e$  - зовнішня індуктивність однієї рейкової нитки довжиною 1 км;

$M$  - взаємна індуктивність 1 км ланцюгів, утворених рейковими нитками й землею.

Зовнішня індуктивність однієї рейкової нитки довжиною 1 км

$$L_e = \left( 12.982 - 2 \cdot \ln(b \cdot \sqrt{\sigma \cdot f}) - j \cdot \frac{\pi}{2} \right) \cdot 10^{-4} \quad (2.18)$$

де  $b$  - радіус окружності довжиною рівної периметру поперечного переріза рейки;  $a$  - питома провідність землі.

Взаємна індуктивність 1 км ланцюгів, утворених рейковими нитками й землею

$$M = \left[ 12.982 - 2 \cdot \ln \left[ (a - b) \cdot \sqrt{\sigma \cdot f} \right] - j \cdot \frac{\pi}{2} \right] \cdot 10^{-4} \quad (2.19)$$

де  $a = 1,6$  м - відстань між осями рейок.

Внутрішня кілометрична індуктивність рейкової нитки

$$L_i = 0.0955 \cdot \frac{R_a}{f} \quad (2.20)$$

Опір ізоляції РЛ для практичних розрахунків звичайно приймають чисто активним, однак на частотах вище 2 кГц воно має активно-ємнісний характер з аргументом порядку -  $10^\circ$

Коефіцієнт земляного тракту, використовуваний при аналізі контрольного режиму, визначається вираженням

$$E = \sqrt{\frac{(1 + 4 \cdot j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot M)}{Z_p}} \quad (2.21)$$

Основні характеристики рейок різних типів, необхідні для розрахунку параметрів РЛ, наведені в табл.2.5.

Частотні залежності модулів опору рейок і коефіцієнта земляного тракту представлені на малюнках 2.7 і 2.8. Параметри визначалися для рейок Р-65 з довжиною торців 25 м із приварними стиковими з'єднувачами. Питома провідність землі приймалася рівною 0,0025 См/м. Частотні залежності хвильових параметрів РЛ для різних значень опору ізоляції представлені на малюнках 2.9 й 2.10.

Таблиця 2.5 - Характеристики рейок

Тип рейки	Активне кілометричний опір рейкової нитки Ом/км	Периметр поперечного переріза рейки $u$ , м	Радіус окружності, що має довжину периметра перерізу $b$ , м
P75	0,0218	0,745	0,119
P65	0,0254	0,70	0,111
P50	0,0318	0,62	0,099
P43	0,0367	0,56	0,089

### 2.2.2.5. Параметри кабельної лінії

Коефіцієнти чотирьохполюсника кабельної лінії (КЛ) виражаються формулами

$$\begin{aligned}
 A &= D = \operatorname{ch}(\gamma \cdot l) \\
 B &= Z_v \cdot \operatorname{sh}(\gamma \cdot l) \\
 C &= \frac{\operatorname{sh}(\gamma \cdot l)}{Z_v}
 \end{aligned}
 \tag{2.22}$$

де  $l$  - довжина кабелю.

Хвильові параметри КЛ визначаються вираженнями

$$\begin{aligned}
 Z_v &= \sqrt{\frac{(R + j2\pi fL)}{(G + j2\pi fC)}} \\
 \gamma &= \sqrt{(R + j2\pi fL) \cdot (G + j2\pi fC)}
 \end{aligned}
 \tag{2.23}$$

де  $R$  й  $L$ - кілометричний активний опір й індуктивність лінії;  
 $G$  й  $C$ - кілометрична провідність ізоляції і ємність лінії.

Всі первинні параметри КЛ (крім ємності) є частотно-залежними й визначаються геометричними розмірами провідників, їхнім взаємним розташуванням, параметрами матеріалів провідників й ізоляції.

Апаратура тональних РК до польового устаткування підключається з використанням симетричних кабелів з парною скруткою типів Сбпу й Сбпашп. При розрахунках звичайно використовують наступні значення первинних параметрів цих кабелів:  $R = 47 \text{ Ом/км}$ ,  $C = 50 \text{ нФ/км}$ , думаючи  $L = 0$  та  $G = 0$ . Ці значення є наближеними й не можуть бути використані для довільних видів кабелів та у більш широкому частотному діапазоні. У зв'язку із цим розглянемо загальну методику знаходження первинних параметрів КЛ.

Активний опір КЛ складається з опорів струмопровідних жил і втрат, обумовлених впливом електромагнітного поля розглянутого ланцюга на сусідні провідники й інші металеві частини конструкції кабелю (екран, оболонка, броня та ін.).

Кілометричний опір шлейфа із двох провідників постійному струму визначається виразом

$$R_0 = \rho \cdot \frac{8000}{\pi \cdot (d_0)^2} \quad (2.24)$$

де  $\rho$  - питомий опір провідника, для мідних жил становить  $0,01754 \dots 0,0182 \text{ Ом м}^2/\text{м}$  при температурі  $+20 \text{ C}$ ;  $d_0$  - діаметр жили без ізоляції, мм.

Для довільних значень температури  $t$  опір розраховується по формулі

$$R_t = R_{20}(1 + \alpha(t - 20)) \quad (2.25)$$

де  $R_{20}$  - опір при температурі  $+20^\circ\text{C}$ ;  $\alpha$  - температурний коефіцієнт опору, для мідних провідників становить  $0,00461/\text{град}$ .

Активний кілометричний опір лінії для парної скрутки, з урахуванням втрат на змінному струмі,

$$R = R_0 \cdot \left[ 1 + F(x) + \frac{p \cdot G(x) \cdot \left(\frac{d_0}{a}\right)^2}{1 - H(x) \cdot \left(\frac{d_0}{a}\right)^2} \right] \cdot k \quad (2.26)$$

де  $R_0$  - кілометричний опір лінії при постійному струмі;

$F(x)$ ,  $G(x)$ ,  $H(x)$  - функції, що враховують збільшення опору, викликаний поверхневим ефектом і втратами на вихрові струми;

$a$  - відстань між осями жил;

$p$  - поправочний коефіцієнт, значення якого приймаються наступними: для парної скрутки жил - 1, для основного ланцюга зіркової скрутки -5, для штучного ланцюга - 1,6; для основного ланцюга подвійної парної скрутки - 2, для штучного ланцюга - 3,5;

$k$  - коефіцієнт укрутки, обумовлений залежністю від діаметра повива по табл.2.6.

Таблиця 2.6 - Коефіцієнти укрутки жил

Діаметр повива, мм	до 30	31-40	41-50	51-60	61-70	71-80
Коеф. укрутки до:	1,010	1,016	1,025	1,037	1,050	1,070

Індуктивність кабельного кола складається із внутрішньої індуктивності кожного провідника й зовнішньої індуктивності, обумовленої зовнішнім магнітним потоком. Кілометрична індуктивність лінії

$$L = \left( 4 \cdot \ln \left( \frac{2 \cdot a - d_0}{d_0} \right) + Q(x) \right) \cdot k \cdot 10^{-4} \quad (2.27)$$

де  $Q(x)$  - функція, що враховує частотну залежність внутрішньої індуктивності струмопровідних жил.

Значення функцій  $F(x)$ ,  $G(x)$ ,  $H(x)$  і  $Q(x)$  (див. малюнки 2.11 й 2.12) визначаються залежно від значення параметра

$$x = \frac{d_0 \cdot \sqrt{2\pi f \mu}}{2} \quad (2.28)$$

де  $f$  - частота струму;

$\mu$  - відносна магнітна проникність провідника

Для мідних жил параметр

$$x = 0.0105 \cdot d_0 \cdot \sqrt{f}$$

Ємність кабельного ланцюга аналогічна ємності конденсатора, у якого роль обкладок виконують струмопровідні жили, а діелектриком служить ізолюючий їхній матеріал.

Кілометрична ємність кабельної лінії

$$C = \frac{k \cdot \varepsilon \cdot 10^{-6}}{36 \cdot \ln \left( 2a \cdot \frac{\Psi}{d_0} \right)} \quad (2.29)$$

де  $\varepsilon$  - діелектрична проникність ізоляції;

$\Psi$  - поправочний коефіцієнт, що враховує видалення жил кабелю від заземленої оболонки; для кабелів СБПУ дорівнює 0,644.

Для ланцюгів з комбінованою ізоляцією еквівалентна діелектрична проникність визначається вираженням

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_1 S_1 + \varepsilon_2 S_2}{S_1 + S_2} \quad (2.30)$$

де  $\varepsilon_1$  й  $\varepsilon_2$  - діелектричні проникності, а  $S_1$  й  $S_2$  - площа поперечних перерізів першого й другого діелектриків.

Кілометрична провідність ізоляції КЛ складається із двох складових: провідності на постійному струмі та провідності, обумовленої діелектричними

втратами на змінному струмі. Для розглянутих кабелів мінімально припустимий опір ізоляції постійному струму становить 5000 МОм\*км, тому першою складовою кілометричної провідності можна знехтувати та зауважати, що

$$G = 2\pi f \cdot C \cdot \tan(\delta) \quad | \quad (2.31)$$

де  $\delta$  - кут діелектричних втрат в ізоляції.

### 2.2.3. Розрахунок рейкових кіл з використанням чотириполюсної моделі

Класична методика розрахунку РК передбачає заміщення її складових частин еквівалентними чотириполюсниками, параметри яких вибираються виходячи з найгірших умов для кожного з режимів роботи. Вихідними даними для розрахунку є: принципова схема РК і параметри її апаратури; довжина РЛ; довжина сполучних кабелів; частота сигнального струму й струму АЛС; діапазони зміни опору ізоляції та опори рейок; рівні сигналів спрацьовування, відпускання (неспрацьовування) і перевантаження колійного й локомотивного приймачів, а також коефіцієнти їхнього повернення; припустимі коливання напруги джерела живлення.

Завданням розрахунків є знаходження припустимого діапазону напруги джерела живлення, при якому забезпечується робота РК у всіх режимах.

#### 2.2.3.1. Розрахунок нормального режиму

Для забезпечення роботи РК у нормальному режимі (рейкове коло вільне й справне), необхідне виконання двох граничних умов:

- 1) при мінімальній напрузі джерела живлення і найгірших умов для передачі сигналу, напруга (струм) на вході колійного приймача повинна бути не нижче значень надійного спрацьовування;
- 2) при максимальній напрузі джерела живлення й найкращих умов для передачі сигналу, напруга (струм) на вході колійного приймача повинна бути не вище значень припустимого перевантаження.

Критеріями першої умови є напруга  $U$ , струм  $I$  і потужність  $S$  джерела живлення, при яких колійний приймач надійно спрацьовує. Критерієм другої умови служить співвідношення  $K_{\text{ПЕРmax}} < K_{\text{пердоп}}$ , де  $K_{\text{ПЕРmax}}$  - максимальний, а  $K_{\text{пердоп}}$  - допустимий коефіцієнт перевантаження колійного приймача.

Для розрахунку складається схема заміщення РК (мал.2.2) і перебувають параметри вхідних у неї чотирьох полюсників: Н (апаратури живильного кінця), РЛ (рейкова лінія) і К (апаратури прийомного кінця). Потім перебувають параметри загальної матриці еквівалентного чотирьох полюсника

$$\begin{vmatrix} A_O & B_O \\ C_O & D_O \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A_H & B_H \\ C_H & D_H \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} A_{РЛ} & B_{РЛ} \\ C_{РЛ} & D_{РЛ} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} A_K & B_K \\ C_K & D_K \end{vmatrix} \quad (2.32)$$

причому коефіцієнти чотирьох полюсника РЛ визначаються з урахуванням найгірших умов для передачі сигналу (мінімальний опір ізоляції й максимальний опір рейок). На ділянках з електротягою опір ізоляції приймається з урахуванням заземлення контактних опор.

При відомих значеннях напруги  $U_{\text{пспр}}$  і струму  $I_{\text{пспр}}$  спрацьовування колійного приймача, мінімальні напруга й струм джерела живлення перебувають із виражень

$$\begin{aligned} U_{\min} &= A_O \cdot U_P + B_O \cdot I_P \quad (B), \\ I_{\min} &= C_O \cdot U_P + D_O \cdot I_P \quad (A) \end{aligned} \quad (2.33)$$

З урахуванням коливань напруги в живильній мережі, номінальна напруга джерела

$$U = K_{\text{НСmin}} \cdot U_{\min} \quad (2.34)$$

де  $K_{\text{НСmin}}$  - коефіцієнт нестабільності мережі, що враховує припустиме зменшення напруги в порівнянні з номінальним.

Для рейкових кіл змінного струму номінальна напруга мережі приймається рівним 230 В, мінімально припустиме - 197 В, максимальне - 245 В. Таким чином,

$$K_{\text{НСmin}} = 230/197=1,17, \text{ а } K_{\text{НСmax}} = 245/230 = 1,07 .$$

Фактична напруга живлення  $U_{\phi}$  визначається конструктивними особливостями джерела. Якщо РК живиться від колійного трансформатора із секціонованими вихідними обмотками, то фактична напруга вибирається не менш номінального з урахуванням східчастого регулювання напруги (для трансформаторів ПОБС-3 ці градації становлять 5,5 В). У рейкових колах тональної частоти забезпечується плавне регулювання вихідної напруги генератора, тому фактична напруга встановлюється рівною номінальному (розрахунковому).

Для розрахунку фактичного перевантаження колійного приймача необхідно визначити максимальну напругу на його вході  $U_{\text{ппmax}}$  при найкращих умовах для передачі сигналу. При цьому напруга джерела буде дорівнювати  $U_{\phi\text{max}} = K_{\text{НСmax}} \cdot U_{\phi}$ , де  $K_{\text{НСmax}} = 1,07$  - коефіцієнт нестабільності мережі, що враховує припустиме збільшення напруги в порівнянні з номінальним. Параметри загальної матриці еквівалентного чотирьополосника  $A'_{\text{o}}, B'_{\text{o}}, C'_{\text{o}}, D'_{\text{o}}$  повинні визначатися з урахуванням максимального опору ізоляції РЛ і мінімального опору рейок. Звичайно із цією метою приймають  $A'_{\text{рл}} = D'_{\text{рл}} = 1, B'_{\text{рл}} = Z_{\text{рл}} \cdot 1, C'_{\text{рл}} = 0$ , де  $l$  – довжина РЛ.

Тоді

$$U_{\text{ппmax}} = U_{\phi\text{max}} / (A'_{\text{o}} + B'_{\text{o}}) / Z_{\text{пп}} \quad (2.35)$$

де  $Z_{\text{пп}}$  - вхідний опір колійного приймача.

Максимальна напруга на вході колійного приймача не повинне перевищувати припустимого (паспортного) значення.

Для оцінки роботи приймача також використовують максимальний коефіцієнт перевантаження

$$K_{\text{ПЕРmax}} = \frac{U_{\text{ппmax}}}{U_{\text{ппот}}} \quad (2.36)$$

який може бути розрахований через опори передачі еквівалентного чотирьополосника при різних умовах поширення сигналу.

Повна потужність джерела живлення

$$S_{\phi} = U_{\phi} \cdot I_{\phi} \quad (1.37)$$

де  $I_{\phi}$  - сполучений комплекс фактичного струму джерела живлення.

Розрахункова потужність не повинна перевищувати гранично припустиму для обраного джерела живлення.

Якщо в процесі розрахунку з'ясується, що РК не забезпечує роботу в нормальному режимі, то виробляється уточнення вихідних даних (довжина РЛ, мінімальний опір ізоляції), і при необхідності коректування параметрів елементів апаратури. Остаточні результати розрахунку нормального режиму приймаються за основу для розрахунку РК в інших режимах роботи.

### 2.2.3.2. Приклад розрахунку нормального режиму рейкового кола змінного струму частотою 25 Гц із реле типу ДСШ-13

Довжина рейкової лінії  $l = 1,2$  км (приклад РК Додаток А); питомий опір ізоляції рейкової лінії  $\gamma_{\text{мін}} = 1$  Ом\*км; робоча напруга реле (напруга повного підйому сектора реле)  $U_{\text{пз}} = U_{\text{р}} = 15$  В; опір реле  $Z_{\text{р}} = 405 e^{j72}$  Ом; коефіцієнт надійного повернення реле  $K_{\text{ВН}} = 0,42$ .

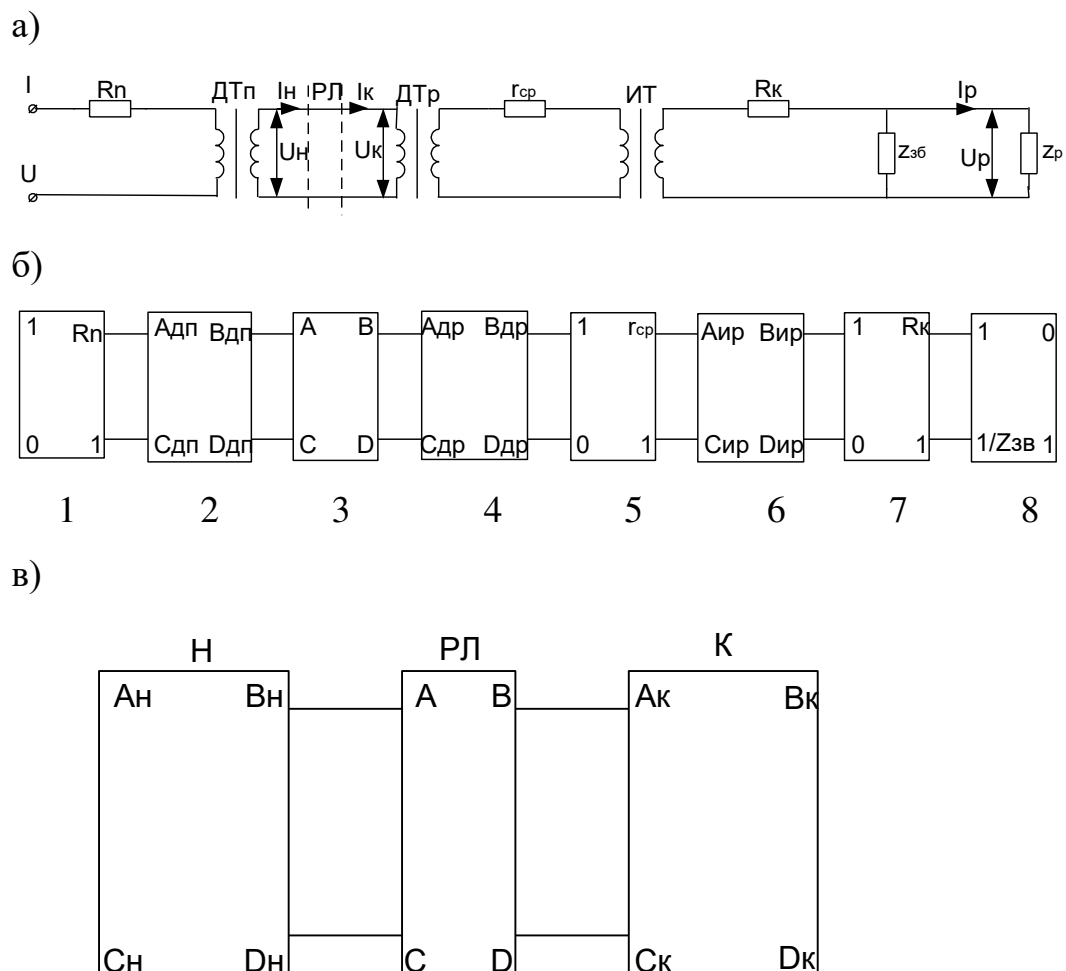
Максимальний обертаючий момент діє на сектор реле при ідеальних фазових співвідношеннях, коли різниця фаз між напругами на місцевому  $U_{\text{мз}} = U_{\text{м}}$  і колійному  $U_{\text{пз}} = U_{\text{р}}$  елементах  $\phi_{\text{мр}} = 90^\circ$ . Векторна діаграма для цього випадку показана на мал. 1.8. За початок відліку прийнятий вектор робочого струму в колійному елементі  $I_{\text{р}} = I_{\text{р}} e^{j0}$ , тобто аргумент комплексу  $I_{\text{р}}$  дорівнює 0. Робочий струм  $I_{\text{р}} = U_{\text{р}}/|z_{\text{р}}| = 0,037$  А. Комплекс робочої напруги  $U_{\text{р}} = I_{\text{р}} \cdot Z_{\text{р}} = 0,037 e^{j0} \cdot 405 e^{j72} = 15 e^{j72}$  В.

На мал. 1.8 вектор  $U_{\text{р}}$  повернутий від вектора  $I_{\text{р}}$  на кут  $\phi_{\text{р}} = 72^\circ$  проти часової стрілки. Між векторами  $U_{\text{м}}$  й  $U_{\text{р}}$  кут  $\phi_{\text{мр}} = 90^\circ$ .

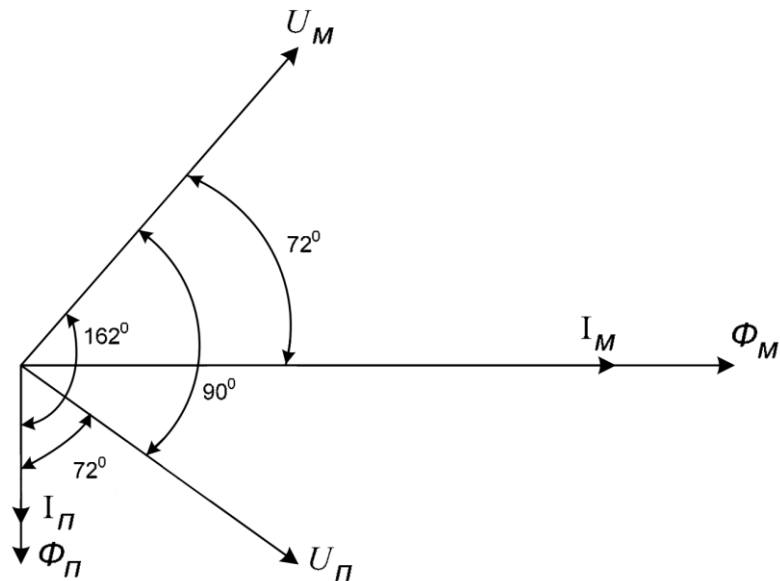
Якщо фази напруг джерел живлення колійного  $U_{\text{а}}$  й місцевого  $U_{\text{м}}$  елементів збігаються, то ідеальний кут між струмом  $I_{\text{р}}$  і напругою  $U_{\text{пз}}$ ,  $\alpha_{\text{и}} = \phi_{\text{р}} + \phi_{\text{мр}} = 72^\circ + 90^\circ = 162^\circ$ . У даній схемі колійний і місцевий елементи живляться від двох параметричних перетворювачів частоти й між напругами цих перетворювачів  $U_{\text{м}}$  й  $U_{\text{п}}$  різниця фаз  $\phi_{\text{мп}} = 90^\circ$ . При ідеальних фазових

співвідношеннях у реле  $\phi_{\text{мп}} = 90^\circ$ . Ідеальний кут аи між струмом  $I_p$  і напругою  $U_{\text{п}}$  називається наведеним аи  $= \phi_p = 72^\circ$ .

Параметричні перетворювачі частоти мають часткову здатність стабілізації вихідної напруги. При коефіцієнті нестабільності джерела живлення частотою 50 Гц  $K_{\text{и}} = 1,25$ , на частоті 25 Гц  $K_{\text{и}} = 1,05$ , тобто  $K_{\text{нстmin}} = 1,025$ . Опір активного обмежника  $R_{\text{п}} = 2,2$  Ом; опір сполучних проводів між дроселем-трансформатором і релейним ізолюючим трансформатором  $r_{\text{сп}} = 0,5$  Ом; опір кабелю між ізолюючим трансформатором і реле  $R_{\text{к}} = 150$  Ом, опір захисного блоку типу ЗБ-ДСШ  $Z_{\text{ЗБ}} = 407 e^{-j83'35'}$ .



Малюнок 2.7 – Розрахункова схема заміщення РК змінного струму частотою 25 Гц з реле типу ДСШ-13, а) – загальна схема РК, б) – індивідуальні чотирьохполюсники елементів РК, в) – загальна схема заміщення РК через чотирьохполюсники.



Малюнок 2.8 Векторна діаграма реле типу ДСШ-13.

Обираємо коефіцієнти чотириполіусників дроселя-трансформатора типу ДТ-1-150 на релейному кінці:  $A_{др}=0,333$ ;  $B_{др}=0,0525 e^{j40}$  Ом;  $C_{др}=0,49 e^{-j70}$  СМ;  $D_{др}=3$ ; на живильному кінці:  $A_{дп}=3$ ;  $B_{дп}=0,05 e^{j35}$  Ом;  $C_{дп}=0,302 e^{-j60}$  СМ;  $D_{дп}=0,333$ ; ізолюючого трансформатора типу ПРТ-А на релейному кінці при коефіцієнті трансформації  $n=18,3$ ;  $A_{ир}=0,055$ ;  $B_{ир}=3,9 e^{j36}$  Ом;  $C_{ир}=0,0033 e^{-j80}$  СМ;  $D_{ир}=18,3$ .

Коефіцієнт поширення рейкової лінії

$$\gamma = \sqrt{\frac{z}{r_{л}}} = \sqrt{0,5 \frac{e^{j52^\circ}}{1}} = 0,707 e^{j52^\circ} \frac{1}{\text{км}}$$

$$\gamma = \alpha + j\beta = 0,635 + j0,31 \frac{1}{\text{км}}$$

Коефіцієнти чотириполіусників вибирають із таблиці або розраховують по формулах, використовуючи співвідношення:

$$\text{ch}\gamma l = \text{ch}\alpha l \cdot \cos(\beta l) + j \cdot \text{sh}\alpha l \cdot \sin(\beta l)$$

$$\text{sh}\gamma l = \text{sh}\alpha l \cdot \cos(\beta l) + j \cdot \sin(\beta l) \cdot \text{ch}\alpha l$$

$$A=1,254 e^{j14}; B=0,646 e^{j57} \text{ Ом}; C=1,292 e^{j5} \text{ СМ}; D=A.$$

При розрахунку нормального режиму роботи рейкового кола послідовно обчислюють напруга й струм на вході кожного чотирьохполюсника каскадної схеми заміщення (мал.1.5):

$$U_8 = U_P = 15 \cdot e^{j72^0} \text{ В}, I_8 = \frac{U_P}{Z_{3Б}} + I_P = 0,0157 \cdot e^{j77^0} \text{ А},$$

$$U_7 = U_8 + R_K \cdot I_8 = 15 \cdot e^{j72^0} + 150 \cdot (0,0157 \cdot e^{j77^0}) = 17,3 \cdot e^{j72,40^0} \text{ В}, I_7 = I_8 = 0,0157 \cdot e^{j77^0} \text{ А},$$

$$U_6 = A_{HP} \cdot U_7 + B_{HP} \cdot I_7 = 0,055 \cdot (17,3 \cdot e^{j72,40^0}) + 3,9 \cdot e^{j36^0} \cdot (0,0157 \cdot e^{j77^0}) = 1,0 \cdot e^{j75^0} \text{ В},$$

$$I_6 = C_{HP} \cdot U_7 + D_{HP} \cdot I_7 = 0,0033 \cdot e^{-j80^0} \cdot (17,3 \cdot e^{j72,40^0}) + 18,3 \cdot (0,0157 \cdot e^{j77^0}) = 0,298 \cdot e^{j66,04^0} \text{ А},$$

$$U_5 = U_6 + r_{CP} \cdot I_6 = 1 \cdot e^{j75^0} + 0,5 \cdot (0,298 \cdot e^{j66,04^0}) = 1,15 \cdot e^{j73,50^0} \text{ В}, I_5 = I_6 = 0,298 \cdot e^{j66,04^0} \text{ А}.$$

Напруга й струм наприкінці рейкової лінії:

$$U_K = A_{ДР} \cdot U_5 + B_{ДР} \cdot I_5 = 0,333 \cdot (1,15 \cdot e^{j73,50^0}) + 0,0525 \cdot e^{j40^0} \cdot (0,298 \cdot e^{j66,04^0}) = 0,367 \cdot e^{j15,4^0} \text{ В},$$

$$I_K = C_{ДР} \cdot U_5 + D_{ДР} \cdot I_5 = 0,49 \cdot e^{-j70^0} \cdot (1,15 \cdot e^{j73,50^0}) + 3,0 \cdot (0,298 \cdot e^{j66,04^0}) = 1,044 \cdot e^{j39,34^0} \text{ А}.$$

Напруга й струм на початку рейкової лінії:

$$U_H = A \cdot U_K + B \cdot I_K = 1,3 \cdot e^{j96^0} \text{ В},$$

$$I_H = C \cdot U_K + D \cdot I_K = 2,06 \cdot e^{j81,30^0} \text{ А}.$$

Напруга й струм додаткової обмотки дросель-трансформатора:

$$U_2 = A_{ДП} \cdot U_H + B_{ДП} \cdot I_H = 4,02 \cdot e^{j96^0} \text{ В},$$

$$I_2 = C_{ДП} \cdot U_H + D_{ДП} \cdot I_H = 0,899 \cdot e^{j50,43^0} \text{ А}.$$

Мінімальна напруга й струм живлячого трансформатора

$$U_{\min} = U_2 + 2,2 \cdot I_2 = 4,02 \cdot e^{j96^0} + 2,2 \cdot (0,899 \cdot e^{j50,43^0}) = 5,109 \cdot e^{j78,32^0} \text{ В}$$

$$I_{\min} = I_2 = 0,899 \cdot e^{j50,43^0} \text{ А}$$

Відхилення від ідеальних фазових співвідношень у нормальному режимі (кут расстройки реле)  $\varphi_U = 78^\circ 32'$  – аргумент комплексу  $U_{min}$ .

Мінімальна наведена напруга колійного трансформатора  
 $U_{min} = U_{min} / \cos \beta_H = 5,109 e^{j36'49'} / \cos(6^\circ 32') = 5,123 e^{j36'49'}$  В.

Номінальна наведена напруга колійного трансформатора з урахуванням можливого зменшення напруги на колійному й місцевому елементі внаслідок нестабільності джерела живлення

$$U = U_{min} \cdot K_{HCmin}^2 = 5,381 \cdot e^{j78.32^\circ} \text{ В}$$

Для трансформатора типу ПРТ-А можна прийняти  $U_\phi = 5.5$  В, тому  $K_{тр} = 5.5 / 5.38 = 1.02$ . Місцевий елемент живиться напругою 110В від перетворювача частоти, що має таку градацію напруги, тому  $K_{трм} = 1$ .

Фактичний наведений струм колійного трансформатора

$$I_\phi = K_{ТР} \cdot K_{HCmin}^2 \cdot I_{min} / \cos(\beta_H) = 0,966 \cdot e^{j50.43^\circ} \text{ А}$$

Різниця фаз між напругою й струмом  $\varphi = 78^\circ 32' - 50^\circ 43' = 27^\circ 49'$ .

Гадана (повна) потужність, споживана рейковим колом у нормальному режимі,  $S_\phi = U_\phi I_\phi = 5.5 \cdot 0.966 = 5.32 \text{ В} \cdot \text{А}$ .

Активна потужність  $P_\phi = S_\phi \cdot \cos \varphi = 5.32 \cos(27^\circ 49') = 4.7 \text{ Вт}$ .

Реактивна потужність  $P_\phi = S_\phi \cdot \sin \varphi = 5.32 \sin(27^\circ 49') = 2.48 \text{ вар}$ , тобто основна частина споживаної потужності активна.

### 2.2.3.3. Розрахунок шунтового режиму

Для забезпечення роботи РК у шунтовому режимі (рейкове коло зайняте рухомим составом), необхідно, щоб при максимальній напрузі джерела живлення й найкращих умов для передачі сигналу, напруга (струм) на вході колійного приймача були не вище значень його надійного відпускання (неспрацьовування).

Критерієм шунтового режиму є коефіцієнт шунтової чутливості

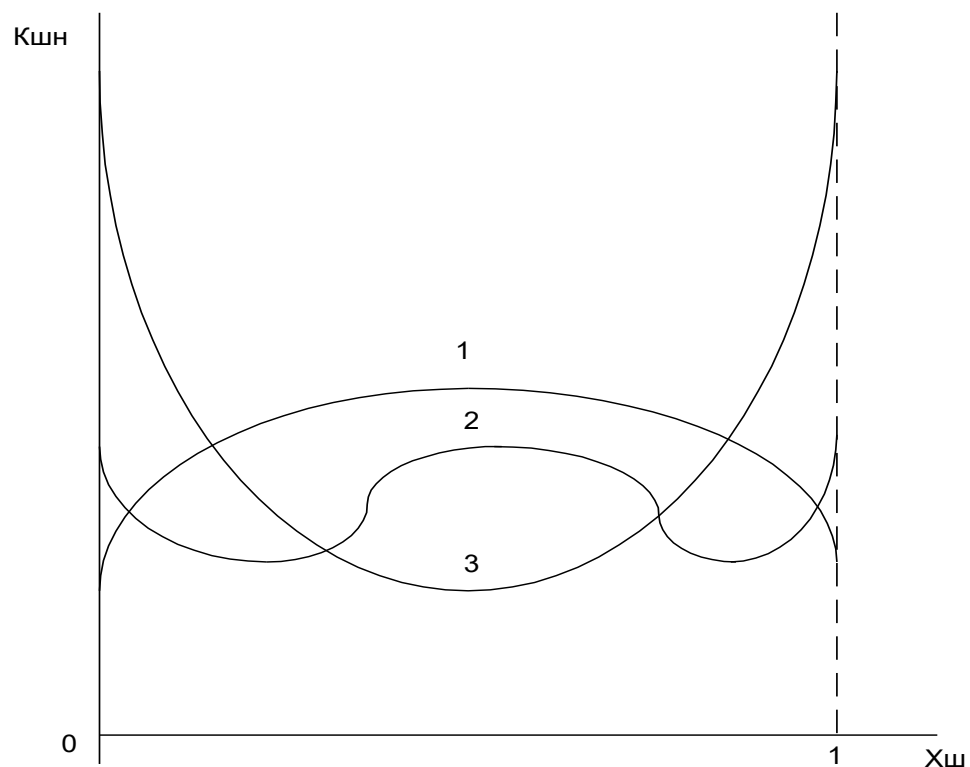
$$K_{ш} = \frac{U_{шот}}{U_{шшф}} \geq 1 \quad (2.38)$$

де  $U_{шот}$  - напруга надійного відпускання (неспрацьовування) колійного приймача;

$U_{шшф}$  - фактична напруга на вході колійного приймача при накладенні на РЛ нормативного шунта й найкращих умов для передачі сигналу.

Рівень сигналу на колійному приймачі залежить від координати точок накладення шунта. Тому в загальному випадку розрахунок шунтового режиму варто виконувати кілька разів, з метою знаходження тієї координати, у якій шунтова чутливість мінімальна.

Дослідженнями встановлено, що характер зміни шунтової чутливості залежить від модулів й аргументів вхідних опорів чотирьох полюсників Н і К стосовно рейкової лінії. Залежність  $K_{шн}$  від координати накладення шунта представлена на мал.2.9.



Малюнок 2.9 – Залежність  $K_{шн}$  від координати шунта

Якщо аргументи опорів  $Z_{ВХН}$  й  $Z_{ВХК}$  позитивні, то найгірші умови для шунтового режиму мають місце на кінцях РЛ (крива 1), причому  $K_{ШН}$  буде менше на тій кінці, де менше модуль відповідного вхідного опору.

Якщо аргументи опорів  $Z_{ВХН}$  й  $Z_{ВХК}$  негативні, то при невеликих модулях цих опорів характер зміни шунтової чутливості ілюструє крива 2, а при більших модулях - крива 3.

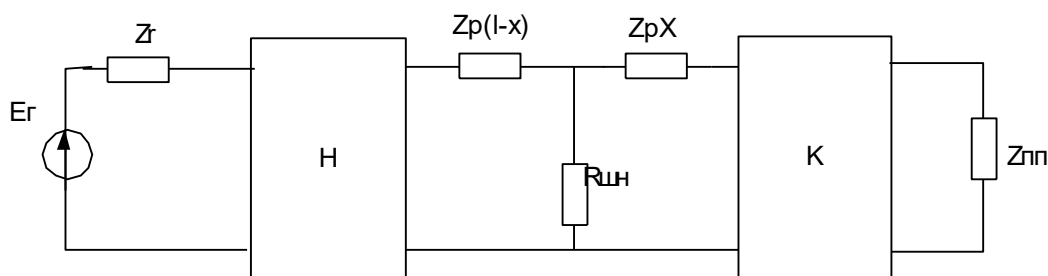
Для розрахунку шунтового режиму використовується схема заміщення РК (мал. 1.10). Коефіцієнти чотиріполюсника РЛ визначаються зі співвідношень

$$A_{Ш} = 1 + \frac{z_p \cdot (1-x)}{R_{ШН}}, \quad B_{Ш} = z_p \cdot 1 + \frac{z_p \cdot x \cdot z_p \cdot (1-x)}{R_{ШН}},$$

$$C_{Ш} = \frac{1}{R_{ШН}}, \quad D_{Ш} = 1 + \frac{z_p \cdot x}{R_{ШН}}, \quad (2.39)$$

де  $x$  - відстань від прийомного кінця до місця накладення шунта;

$R_{ШН}$  - опір нормативного шунта.



Малюнок 2.10 – Схема заміщення РК у шунтовому режимі

З обліком цього обчислюють параметри загальної матриці еквівалентного чотиріполюсника  $A''_0, B''_0, C''_0, D''_0$ . Знаючи фактичну напругу живлення РК, отримане при розрахунку нормального режиму, визначають напруга на вході колійного приймача в шунтовому режимі

$$U_{пшф} = U_{ф\max} / (A''_0 + B''_0) / Z_{пп} \quad (2.40)$$

і порівнюють його з максимально допустимим  $U_{п\text{пот}}$ , перевіряючи виконання умови (1.40) для різних точок накладення шунта.

### 2.2.3.4. Приклад розрахунку шунтового режиму рейкового кола змінного струму частотою 25 Гц із реле типу ДСШ-13.

Вихідні дані й основні розрахункові параметри такі ж, як й у прикладі розрахунку нормального режиму. Вхідні опори на кінцях рейкової лінії  $Z'_{\text{ВХН}} = 0,229 e^{j11'49'}$  Ом й  $Z_{\text{ВХК}} = 0,342 e^{j36'49'}$ . Аргументи вхідних опорів позитивні  $|Z'_{\text{ВХН}}| = 0,229$   $|Z_{\text{ВХК}}| = 0,342$ , тому шунтова чутливість гірше на живильному кінці. Коефіцієнти чотириполюсника рейкової лінії при накладенні шунта на живильному кінці згідно (3.30):

$$A_{\text{шп}}=1;$$

$$B_{\text{шп}}= Zl= 0.5 e^{j52} \cdot 1.2 \text{ Ом};$$

$$C_{\text{шп}} = 1/R_{\text{шп}} = 16,67 \text{ См};$$

$$D_{\text{шп}}= 1 + Zl/R_{\text{шп}}=1 + 0,5 e^{j52} \cdot 1,2/0,06= 10,642 e^{j47^{\circ}56'}.$$

Напряга й струм надійного повернення:

$$U_{\text{ВН}} = U_p \cdot K_{\text{ВН}}= 15 \cdot 0,42 = 6,3 \text{ У};$$

$$I_{\text{ВН}}=I_p \cdot K_{\text{ВН}} = 0,037 \cdot 0,42 = 0,01554 \text{ А}.$$

Допустиме напруження живлення в шунтовому режимі визначають при послідовному обчисленні напруг і струмів на входах всіх чотириполюсників каскадної схеми заміщення (див. мал.2.5):

$$U_8 = U_{\text{ВН}} = U_p K_{\text{ВН}} = 15 e^{j72^{\circ}} \cdot 0,42 = 6,3 e^{j72^{\circ}} \text{ В};$$

$$I_8 = (1/Z_{\text{ЗБ}})U_{\text{ВН}} + I_{\text{ВН}} = 6,3 e^{j72^{\circ}} / 407 e^{-j83'35'} + 0,0155=0,0066 e^{j77^{\circ}} \text{ А}.$$

Аналогічно обчислюють напруги й струми на входах інших чотирьополіусників. При розрахунку  $U_n$  й  $I_n$  як коефіцієнти рейкового чотирьополіусника використовуються коефіцієнти  $A_{шп}$ ,  $B_{шп}$ ,  $C_{шп}$ ,  $D_{шп}$ . Після всіх обчислень одержимо максимальну напругу живлення при накладенні шунта на живильному кінці  $U_{шп\max} = 6,98 e^{j81^{\circ}31'}$  В.

Відхилення від ідеальних фазових співвідношень у шунтовому режимі  $v_{шп} = \phi U_{шп} - a_i = 81^{\circ}31' - 72^{\circ} = 9^{\circ}31'$ . Максимальна наведена напруга колійного трансформатора  $U_{дшп\max} = U_{шп\max} / \cos v_{шп} = 6.98 / \cos 9^{\circ}31' = 7,067$  В.

Припустима номінальна напруга колійного трансформатора з урахуванням можливого збільшення напруги на колійному й місцевому елементах внаслідок нестабільності джерела живлення

$$U_{дшп} = U'_{шп\max} / K_{нс\max}^2 = 7.067 / 1.025^2 = 6,73 \text{ В.}$$

Чутливість рейкового кола до нормативного  $K_{шпшп} = U_{дшп} / U_{\phi} = 6,73 / 5,5 = 1,22$ , тобто шунтовий режим забезпечується з деяким запасом.

### **2.3. Висновок по класичному методу розрахунку рейкових кіл й обґрунтування необхідності застосування альтернативного методу.**

Класичний метод розрахунку припускає подання окремих ділянок електричної схеми РК чотирьополіусниками з відомими коефіцієнтами, звичайно в А-формі. Відшукання коефіцієнтів схем з лінійними елементами не представляє метрологічних і математичних ускладнень. Разом з тим, у кіл, що містять нелінійні феромагнетики (ФМ), одержання коефіцієнтів на всьому діапазоні зміни індукцій у сердечниках досить важке завдання, оскільки класичні методи ХХ і КЗ стають не прийнятними. Це призводить до ускладнення методів визначення як модуля, так й аргументів коефіцієнтів чотирьополіусників. Зокрема, така проблема виникає в умовах насичення колійних дроселів-трансформаторів, наприклад типу ДТ.1.150, при підвищених асиметриях РЛ. У цьому випадку індукція (напруженість) магнітного поля сердечника змінюється за складним законом

$$b = b_0 + \sum_{k=1}^m b_{ks} \sin k\omega t + \sum_{k=1}^m b_{kc} \cos k\omega t, \quad (2.41)$$

де  $k = 1, 2, 3, \dots, m$ , і вимір коефіцієнтів чотиріполюсників утруднено.

У роботі розглянутий новий підхід до розрахунку РК із урахуванням втрат у феромагнетиках, без пошуку коефіцієнтів чотиріполюсників схеми заміщення. При побудові моделі перемагнічування ФМ у паралельних магнітних полях найбільш точними є апроксимуючі методи, що враховують не тільки зміни величин  $b$  і  $h$  в часі, але і їхні похідні.

З розвитком обчислювальної техніки й програмного забезпечення математичні методи розрахунку РК при значній зміні індуктивності феромагнетиків, включаючи ділянки насичення, стають реальними.

## РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК РЕЙКОВОГО КОЛА З ВИКОРИСТАННЯМ ПЕТЛІ ГІСТЕРЕЗИСУ.

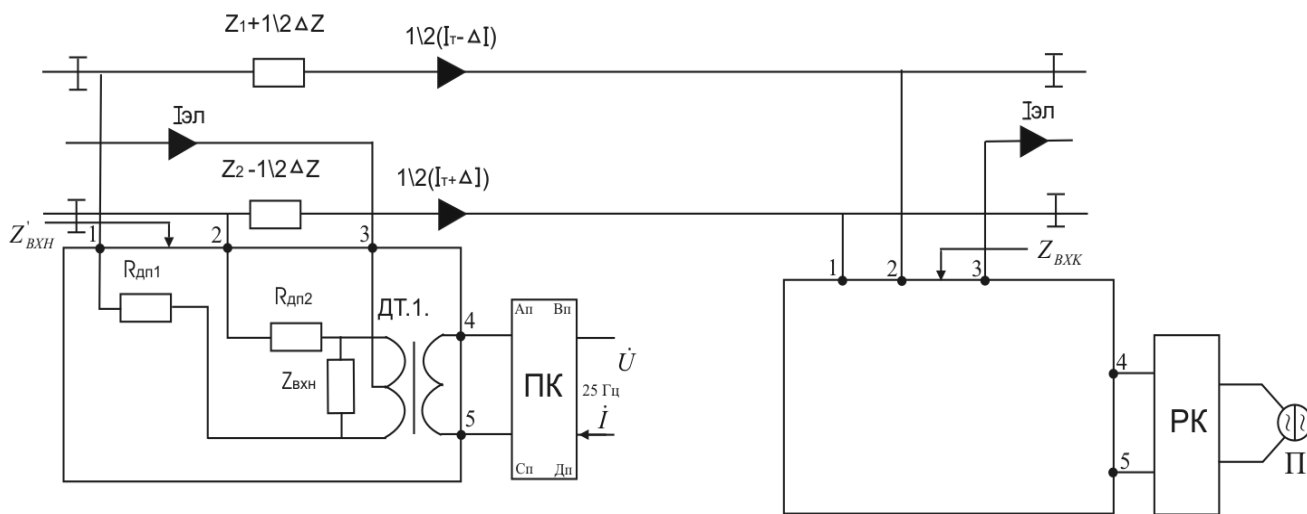
### 3.1. Загальні відомості про станцію, розрахунок рейкового кола якої наведені в роботі.

На ділянках залізниць із електротягою змінного струму, що примикають до станцій стикування, при певній схемі комутації тягової мережі постійного струму в рейковій мережі цієї станції виникають підвищені потенціали постійного струму «рейка-земля». У цьому випадку істотно зростають постійні струми витоку в перегінній колії, оснащені електротягою змінного струму та створюються умови для намагнічування колійних дроселів-трансформаторів (ДТ.1) і порушення роботи РК (довжиною менш 500м) і станційних світлофорів. Струм намагнічування, у свою чергу, залежить від асиметрії РЛ по постійному струму, значно перевищуючому нормативу величину. Така ситуація виникає при живленні контактної мережі розглянутої зразкової станції стикування від двох сусідніх підстанцій постійного струму, що працюють паралельно. Зауважимо тут, що СНІПОм у проектах передбачений захист від впливу струмів витоку на РК ділянки електротяги змінного струму, розташовуваного на відстані менш 10 км від станції стикування. Дослідження, тим часом, показали, що рейкові кола, віддалені від тягової підстанції станції стикування майже на 25 км, працювали з порушенням умов нормального режиму роботи РК, що призводило до спорадичного перекриття світлофорів. З вище сказаного можемо зробити висновок, що підвищення завадостійкості РК систем СЦБ в умовах впливу зворотного постійного тягового струму є актуальною науково-технічною проблемою. У роботі розглянуто вплив режимів роботи системи тягового електропостачання в зоні станції стикування (П'ятихатки – Стикова) на роботу рейкових кіл систем СЦБ при електротязі змінного струму; наведені результати експериментальних вимірів і розрахунків рівнів потенціалів тягового постійного струму при найбільш важких режимах

роботи тягової мережі; розглянуто технічні заходи щодо виключення впливу тягового електропостачання на пристрої СЦБ, зокрема шляхом застосування запропонованих загороджувальних комутуючих блоків.

### 3.2. Оцінка граничної асиметрії опорів рейкових ліній.

Виміри коефіцієнта асиметрії в діючих установках систем СЦБ показують, що його величина, як і варто очікувати, більше взимку, ніж влітку. Обробкою статистичних даних вимірів установлено, що розподіл опору струмопровідних стиків найкраще може бути апроксимовано несиметричним законом Вейбулла, розкид опорів досягає 1,8 - 15 м.ц.р. (метрів цілої рейки), коефіцієнт поздовжньої асиметрії коливається від 10%...12% - влітку до 18%...28% - взимку.



Малюнок 3.1. – Схема заміщення рейкового кола.

### 3.3. Вибір математичної моделі петлі гістерезису.

Зауважимо, що феромагнетики – нелінійні динамічні об'єкти з «нескінченною» пам'яттю, роль якої виконує залишкова магнітна індукція. При циклічній зміні зовнішнього магнітного поля магнітна індукція, що виникає у феромагнетику, відстає по фазі і дає цикл динамічної петлі гістерезису (мал.3.2). Цикл ПГ отриманий для ДТ.1.150 на частоті 25 Гц при впливі

сигналу, що містить постійну складову індукції й змінну частотою 25 Гц (приклад стенду Додаток Б).

Установлено, що найкраще наближення до експериментальних характеристик дає математична модель ПГ

$$h = Ae^{-\gamma^2 bm^2} \alpha_1 \operatorname{sh} \beta_1 b + \alpha_2 \frac{db}{dt} \operatorname{ch} \beta_2 b, \quad (3.2)$$

що дозволяє врахувати вплив всіх гармонік, вхідний, постійний і змінний струми перемагнічування феромагнетиків. Алгоритм такої моделі ФМ не має обмежень на вид тестів зовнішнього впливу та стійкий при ідентифікації параметрів  $(A, \gamma, \alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2)$  (3.2), що відшуковують чисельними методами по експериментальній граничній петлі гістерезису й кривій намагнічування, знятої при максимальних величинах індукції й частоти сигналу. У моделі перемагнічування автоматично вирішується завдання перемикавання нелінійного елемента з однієї галузі ПГ на його іншу галузь (при  $\frac{db}{dt} \ll 0$ ). У рівнянні (2.2) множник  $\alpha_1 \operatorname{sh} \beta_1 b$  першої змінної характеризує основну криву намагнічування (ОКН), на якій лежать вершини приватних симетричних ПГ, а друга змінна (диференційна функція) – описує дисипативні процеси й втрати на гістерезис, вихрові струми й від магнітної в'язкості.

При розрахунках мною прийнятий гармонійний сигнал  $b = bm \cos(\alpha t + \varphi)$ . Коефіцієнти  $\alpha_1$  й  $\beta_1$  безгістерезисна складова петля гістерезису (3.2) визначаються методом обраних точок по середній кривій намагнічування (СКН) [3]; параметри  $A$  й  $\gamma$  визначаються з виражень:

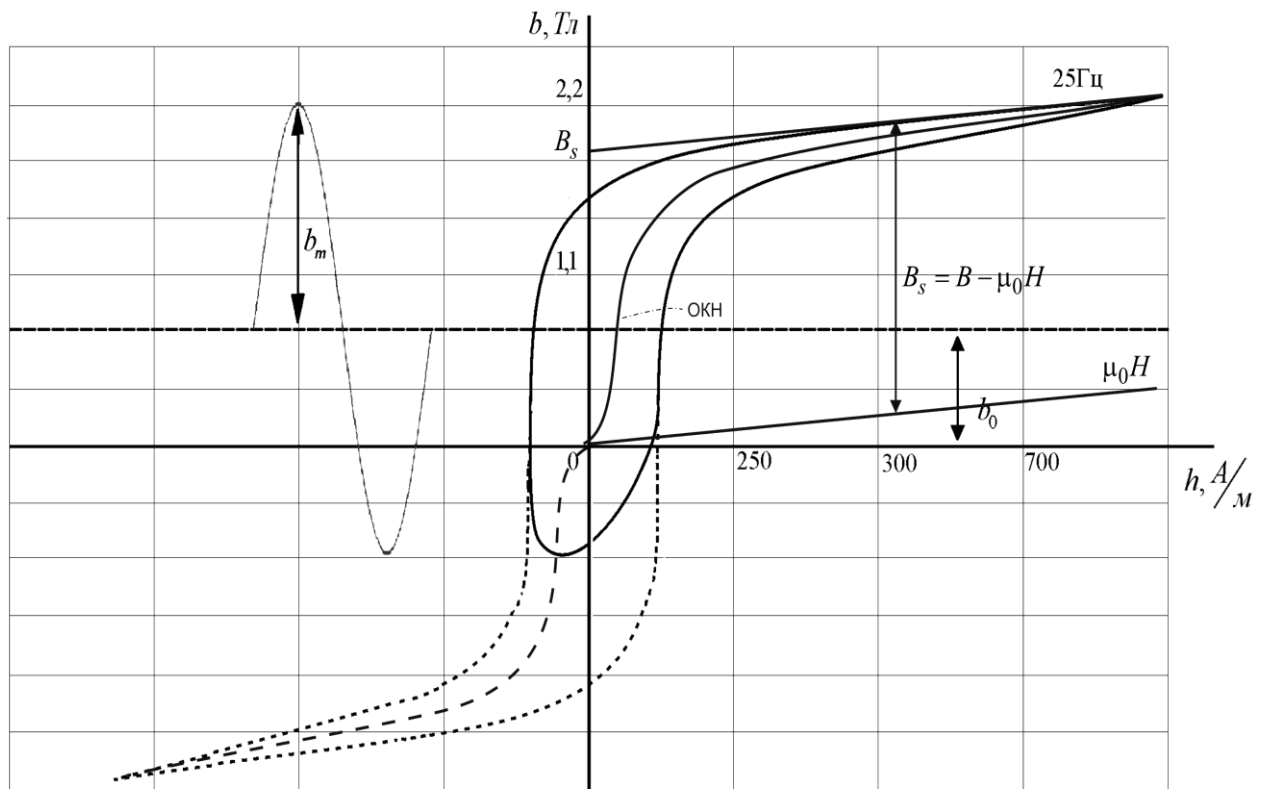
$$\ln(A) = \gamma^2 bm^2 \max; \quad \gamma^2 = \frac{\ln(h_0 / \alpha_1 \cdot \operatorname{sh} \beta_1 \cdot b_0)}{bm^2 \max - b_0^2}, \quad (3.3)$$

причому точки  $b_0$ ,  $h_0$  взято поблизу максимального значення індукції  $bm$  (насичення) і напруженості поля  $hm$ ; індукція  $bm \max$  відповідає максимальному робочому значенню, при цьому  $bm \max > bm$ . Коефіцієнти  $\alpha_2$  й  $\beta_2$  перебувають із формул:

$$\alpha_2 = \frac{h_c}{\omega \cdot bm}, \quad \beta_2 = \frac{1}{bm}, \quad (3.4)$$

де  $h_c$  - коерцитивна сила, А/м.

Таким чином, коефіцієнти рівняння (3.2) легко визначаються, якщо відомі максимальна індукція  $bm_{max}$ ,  $h_c$  і точка на основній кривій намагнічування ( $b_0$ ,  $h_0$ ).



Малюнок 3.2 – Петля гістерезису сердечників ДТ.1.150, (сталь 2412): гармонійний сигнал з підмагнічуванням.

### 3.4. Суть методу розрахунку рейкового кола з використанням петлі Гістерезису й знаходження невідомих змінних.

Алгоритм розрахунку РК запропонованим методом має особливість: оцінка електричних параметрів схеми здійснюється за допомогою магнітних характеристик феромагнетиків, що беруть участь у передачі енергії сигналу.

Для ілюстрації алгоритму скористаємося схемою живильного кінця (мал.3.2.) фазочутливої РК і результатами її розрахунку класичним методом.

Схема містить рейкову лінію, дросель-трансформатор і резистор  $R_{II}$ , включений між живильним трансформатором і вторинною обмоткою дроселя-трансформатора.

Схема заміщення трансформатора звичайно представляється схемою Т-образного чотирьохполюсника. Зауважимо тут, що фізичні процеси перемагнічування реального сердечника відображаються ПГ (мал. 1), що несе інформацію про всі втрати, що враховують схемою заміщення. Остання зведена до чотирьохполюсника, що складається з Г-образної схеми, що включає в себе комплексний опір галузі намагнічування сердечника  $z_0 = \frac{\dot{E}_1}{\dot{I}_0}$  ( $\dot{E}_1$  - ЕДС самоіндукції, струм  $\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \frac{1}{n}\dot{I}_2$  - струм ХХ (мал. 2)),  $r_1$  - опір сталевих дросельних перемичок ДП і перехідних контактних з'єднань ідеального трансформатора (ИТ).

Аргумент опору ланцюга намагнічування визначається в такий спосіб.

Індукційована магнітним потоком  $\dot{\Phi}$  в обмотці ДТ.1.150 напруга в комплексній формі

$$\dot{U}_c = j\omega W \dot{\Phi}.$$

Далі слідє, що потік, що проходить через листові смуги сердечника,

$$\dot{\Phi} = \frac{2\mu b H_0}{(1+j)\beta d} th\beta(1+j)\frac{d}{2}, \quad (3.5)$$

де  $H_0 = \frac{iW}{l}$ ,  $\beta = \sqrt{\pi f \mu_0 \mu_r \gamma}$ ,  $\gamma$  - провідність сталі ( $7 \cdot 10^3 \text{ } 1/\text{Ом} \cdot \text{мм}$ ),  $\mu_r$  - магнітна проникність, прийнята 200 – 500;  $d, b$  - товщина й ширина пакета пластин сердечника.

Стає можливим, використовуючи (2.5), обчислити, на яку величину при змінному струмі сталевий сердечник збільшує комплексний опір обмотки:

$$Z = \frac{\dot{U}_c}{\dot{I}} = \frac{j2\mu_r S \omega W^2}{(1+j)\beta l d} th\beta(1+j)\frac{d}{2}, \quad (3.6)$$

де  $S = a \cdot b$  - площа перерізу пакета, обтічна потоком;  $a$  - висота пакета сталі.

Для низьких частот (менше 1000 Гц)  $Z = \frac{\mu_0 \mu_r S W^2}{l}$ ;  $Z = j\omega L_0$ , де  $L_0$  - індуктивність обмотки по постійному струмі. Вираження (3.6) можна записати у вигляді

$$Z = L_0 \frac{j2\omega}{(1+j)\beta d} \operatorname{th}(1+j) \frac{d}{2} \quad (3.7)$$

і розкласти, потім, на речовинну й мниму частини. У результаті одержимо формули для оцінки збільшення індуктивності

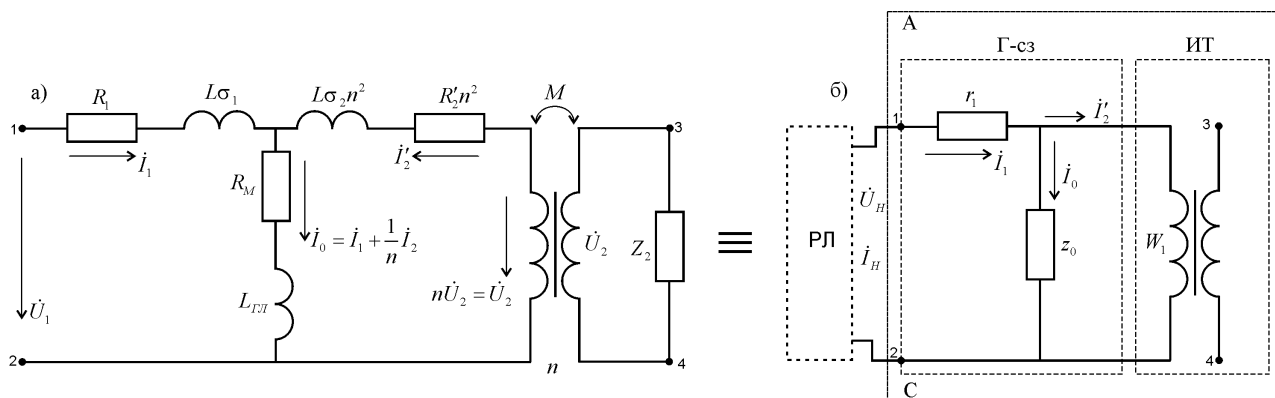
$$L = L_0 \frac{1}{x} \cdot \frac{\operatorname{sh}x + \sin x}{\operatorname{sh}x + \cos x} \quad (3.8)$$

і активного опору обмотки

$$R = \omega L_0 \frac{1}{x} \cdot \frac{\operatorname{sh}x - \sin x}{\operatorname{sh}x + \cos x}, \quad (3.9)$$

де  $x = \beta d$ .

Розрахунки по вираженнях (3.8) і (3.9) показали, що:  $Z = R + j\omega L = 0.56e^{j65}$  Ом. Аргумент опору цілком задовільно збігається з аргументом опору холостого ходу отриманого по формулі  $Z_{xx} = \frac{A}{C} = 0.98e^{j60}$ , де  $A, C$  - коефіцієнти чотириполюсника ДТ.1. 150 живильного кінця РЦ. Різниця величин модулів опорів пояснюється прийнятими розрахунковими величинами магнітної проникності та індукції сердечників. Зауважимо тут, що аналогічний результат дає оцінка опору  $Ze^{j\varphi_z}$  шляхом розрахунків втрат потужності від перемагнічування, вихрових струмів і від магнітної в'язкості.



Малюнок 3.3 – Схема заміщення трансформатора: а) реального; б) розрахункова (з Г-образної схеми й ідеального трансформатора чотириполосників).

A-матриця розрахункової схеми заміщення визначається добутком матриць Г-образного чотириполосника й ідеального трансформатора ИТ, коефіцієнти чотириполосника схеми заміщення рівні:

$$A_T = n \left( 1 + \frac{r_1}{z_0} \right), \quad B_T = nr_1, \quad C_T = \frac{1}{nz_0}, \quad D_T = \frac{1}{n}.$$

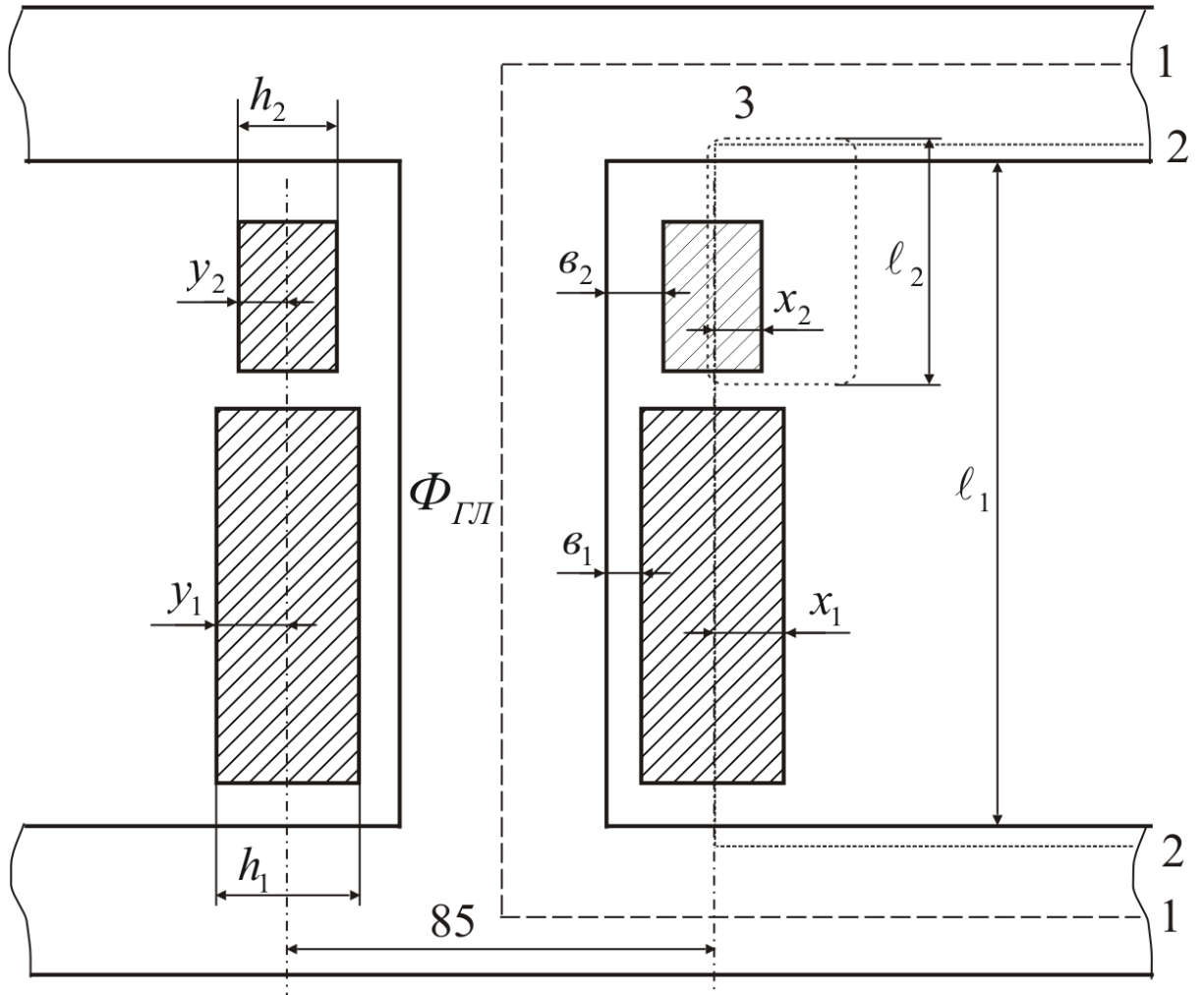
Основні елементи схеми заміщення мають фізичний сенс, що визначає режими роботи трансформатора:  $R_1$ ,  $R_2'n^2$  - активні опори обмоток;  $L\sigma_1$ ,  $L\sigma_2$  - індуктивності розсіювання обмоток, обумовлені потоками розсіювання, струмами обмоток і геометричних параметрів обмоток і магнітопровода;  $M$  - взаємна індуктивність, визначається головними індуктивностями обмоток  $L_{Г11}$ ,  $L_{Г12}$ ;  $L_1$ ,  $L_2$  - індуктивності обмоток; і ін.

### 3.5. Короткий порядок розрахунку рейкового кола з використанням петлі Гістерезису.

Послідовність розрахунку РК зводиться до наступного:

- формування вихідних даних для розрахунку. У прикладі, наведеному нижче, прийняті дані для живильного кінця фазочутливого РК:  $\dot{U}_H = 1.14e^{j94^\circ}$  В,  $\dot{I}_H = 1.75e^{j81^\circ}$  А – напруга й струм на початку рейкової лінії; параметри схеми РК – довжина 1.2 км -  $R_{П} = 2.2$  Ом, частота 25 Гц,

коліїний приймач типу ДСШ 13А, колійний дросель-трансформатор типу ДТ.1.150; параметри існуючої схеми заміщення ДТ.1.150 отримані з конструктивних даних його сердечника й обмоток (мал.3.4). У табл.3.1 наведені основні розрахункові формули схеми заміщення, а в табл.3.2 - параметри магнітопровода й обмоток ДТ.1.150;



Малюнок 3.4 – Для визначення параметрів СЗ ДТ.1.150.

Таблиця 3.1 - Основні параметри схеми заміщення ДТ.1.150

Параметр	Розрахункові формули	Назва параметра
$R_M, 1/\Gamma_H$	$\frac{l}{\mu_0 \mu_r S}$	Опір магнітного ланцюга
$L_1, \Gamma_H$	$\frac{W_1^2}{R_M}$	Індуктивність 1 обмотки
$\Phi_{\GammaЛ1}, BC$	$\frac{L_{\GammaЛ1} i_1}{W_1}$	Головний потік 1 обмотки
$L_2, \Gamma_H$	$\frac{W_2}{i_2} \Phi_{\GammaЛ1}$	Індуктивність 2 обмотки
$\Phi_{12}, BC$	$\Phi_{\GammaЛ1} + 0.5 \mu_0 i_1 W_1 h_1 \frac{l_{B1}}{l_1}$	Потік 2 обмотки, створюваний струмом 1 обмотки
$\sigma, \%$	$\frac{i_1 W_1}{\Phi_{\GammaЛ1}} \cdot \mu_0 \left( \frac{1}{2} h_2 + b_2 \right) \frac{l_{B2}}{l_2} + \frac{1}{3} h_1 \frac{l_{B1}}{l_1}$	Коефіцієнт розсіювання
$R_1, R_2, \text{Ом}$	$\rho \frac{l}{S}$	Опір обмоток
$L_{\GammaЛ1}, \Gamma_H$	$\frac{W_1}{i_1} \Phi_{12}$	Головна індуктивність 1 обмотки
$M, \Gamma_H$	$\frac{W_2}{i_1} \Phi_{12}$	Взаємна індуктивність

Таблиця 3.2 - Параметри магнітопровода й обмоток ДТ.1.150

Параметр	Величина в м	Параметр	Величина в м
$\ell_2$	0.035	$S_c$	$30 \cdot 10^{-4}$
$\ell_1$	0.102	$\epsilon_1$	0.033
$h_1$	0.015	$\epsilon_2$	0.069
$h_2$	0.008	$y_2$	0.004
$W_1$	16	$y_1 = \frac{h_1}{2}$	0.008
$W_2$	48	$x_1 = y_1, x_2 = y_2$	

- складаються рівняння передачі чотириполюсника ДТ.1.150, що мають в А-формі вид:

$$[A] = \begin{bmatrix} U'_H \\ I'_H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_T & B_T \\ C_T & D_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_H \\ \dot{I}_H \end{bmatrix}; \quad (3.8)$$

- розраховуються величини опорів  $r_1$  й  $z_0$ , причому розрахунок останнього виконується у два етапи: спочатку знаходять модуль індукції магнітного поля в сердечнику  $|b| = \frac{\dot{U}'_H + \dot{I}'_H r_1}{4.44 W_1 f S} = 0.243$  Тл, а по формулі (3.2) – напруженість магнітного поля, рівну, як виявилось,  $38.9 \frac{A}{м}$ ; потім визначаємо струм холостого ходу по формулі:  $I_0 = \frac{h \cdot l}{W_1} = \frac{38.9 \cdot 0.5}{16} \approx 1.21$  А аргумент струму прийнятий  $90^\circ$  й, нарешті,  $z_0 = \frac{\dot{U}'_H + \dot{I}'_H r_1}{I_0} \approx 1.05 e^{j65^\circ}$  Ом;
- розраховуються напруга й струм на вході дросель трансформатора по рівняннях (2.8):

$$\dot{U}'_H = n \left( 1 + \frac{r_1}{z_0} \right) \dot{U}_H + n r_1 \dot{I}_H = 4.1 e^{j88^\circ} \text{ В},$$

$$\dot{I}'_H = \frac{1}{n z_0} \dot{U}_H + \frac{1}{n} \dot{I}_H = 0.77 e^{j54^\circ} \text{ А, причому } \dot{I}'_H = \dot{I}_{TP};$$

- розраховуються напруга живильного трансформатора й потужність, споживану ланцюгом:

$$\dot{U}_{TP} = \dot{U}'_H + \dot{I}'_H R_{II} = 5,5e^{j78^0} \text{ В},$$

$$S = \dot{U}_{TP} \dot{I}_{TP}^* = 4.23 \text{ ВА};$$

- визначається кут расстройки приймача:

$$\beta_P = \varphi_{TP} - 72 = 6^0.$$

У табл.3.3 поміщені порівняльні розрахункові параметри РК, отримані двома методами розрахунку - класичним і новим, із застосуванням математичної моделі перемагнічування феромагнетиків.

Таблиця 3.3 - Результати розрахунків РК

Методи розрахунку	$\dot{U}_{ДГ}$	$\dot{I}_{ДГ}$	$\dot{U}_{TP}$	$S$	$\beta_P$	Примітка
	В	А	В	ВА	град	
Класичний	$3.75e^{j95.5^0}$	$0.82e^{j60^0}$	$5.1e^{j78.6^0}$	4.58	$6^0 32'$	Різниця результатів викликана, в основному, обліком опорів ДП зі сталі. Параметри дані без виправлень на кут $\beta_P$
Новий	$4.1e^{j89^0}$	$0.77e^{j54^0}$	$5.5e^{j78^0}$	4.23	$6^0$	
Різниця розрахунках, %	9.3	9.3	7.8	7.64	-	

### **3.6. Висновок щодо впровадження методу розрахунку рейкових кіл з використанням петлі Гістерезису.**

- запропонований метод дає досить високу збіжність розрахункових результатів із класичним методом, причому різниця результатів (не вище 9%) обумовлена, в основному, обліком перехідних опорів з'єднань й опорів дросельних сталевих перемичок;
- метод вимагає створення бази даних по динамічних петлях гістерезису й коефіцієнтам апроксимуючих функцій трансформаторів, застосовуваних у схемах рейкових кіл, для різної інформаційної частоти сигналів;
- до переваг методу варто віднести досягнення більш високої вірогідності розрахунків РК у великому діапазоні індукцій сигнального струму з використанням ПГ феромагнетиків;
- метод виключає експериментальні й аналітичні розрахунки коефіцієнтів чотириполюсників;
- розглянутий метод може знайти застосування в дослідженнях і розрахунках рейкових кіл систем СЦБ.

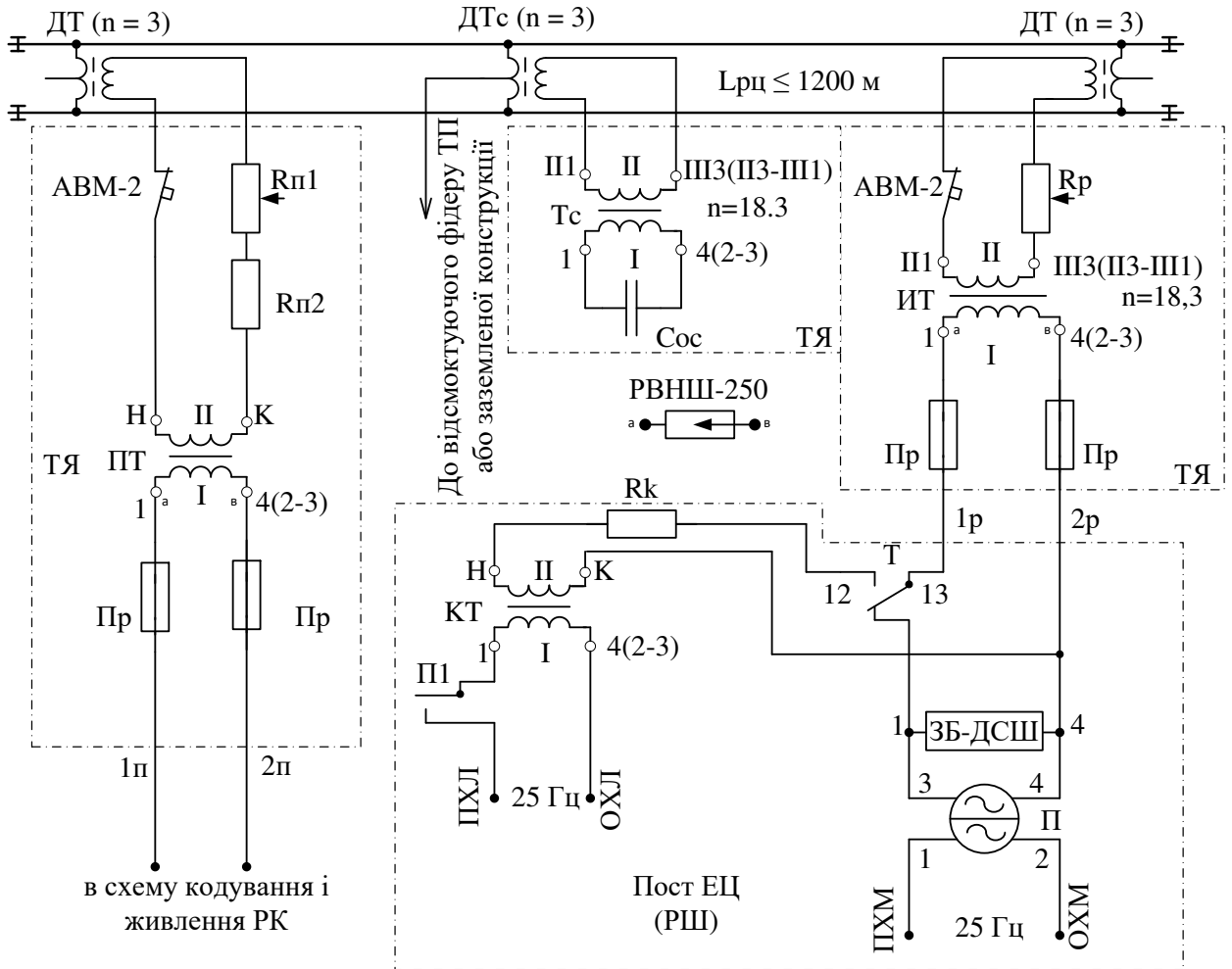
## Література

1. Разгонов А. П. Вплив тягового струму асиметрії на роботу рейкових кіл / А. П. Разгонов, К. І. Ящук, А. Ю. Журавльов // Матеріали III міжнародної науково-практичної конференції «Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті EMCS-R 2011». – Д.:ДНУЗТ, 2011. – С.68.
2. Разгонов А. П. Защита рельсовых цепей в зоне стыкования систем электротяги / А. П. Разгонов, В. А. Дьяков, А. Ю. Журавлев, С. А. Разгонов // Автоматика, связь информатика. – М., 2009. – № 9. — С.19 – 22.
3. Журавльов А. Ю. Про метод розрахунку рейкових кіл з нелінійними феромагнетиками в умовах впливу завад тягового струму / А. Ю. Журавльов // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна – Дніпропетровськ, 2016. – Вип. 1(61). – С. 19–29.
4. Журавльов А. Ю. Оцінка асиметрії рейкової лінії інформаційних частот тонального спектру / А. Ю. Журавльов // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту, 2016. – Вип. 159. – С. 24–33.
5. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров / А. Анго. – Москва : Наука, 1965. – 780 с.
6. Андреев В. С. Теория нелинейных электрических цепей / В. С. Андреев. – Москва : Радио и связь, 1982. – 280 с.
7. Аркатов В. С. Рельсовые цепи. Анализ работы и техническое обслуживание / В. С. Аркатов, Ю. А. Кравцов, Б. М. Степенский. – Москва : Транспорт, 1990. – 295 с.
8. Аркатов В. С. Рельсовые цепи магистральных железных дорог / В. С. Аркатов, Н. В. Котляренко, А. И. Баженов. – Москва : Транспорт, 1982. – 364 с.

9. Бабаєв М. М. Аналіз впливу зовнішніх факторів на роботу рейкового кола / М. М. Бабаєв, А. А. Прилипко // Зб. наук. пр. УкрДАЗТ. – 2007. – Вип. 80. – С. 102-113.

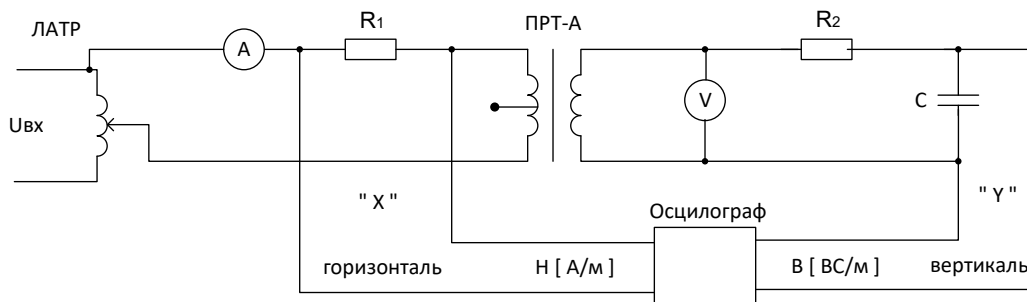
## Додаток А

Для розрахунку використано РК частотою 25 Гц з реле типу ДСШ-13, двома (трьома) ДТ.1.150 і накладанням сигналів АЛС з обох кінців

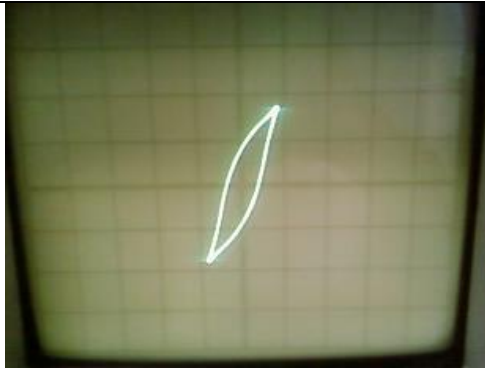
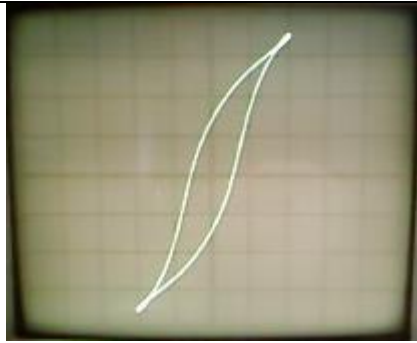
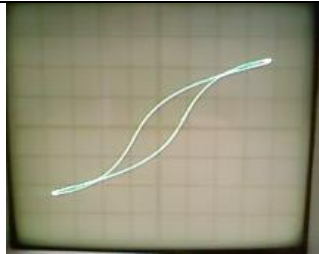






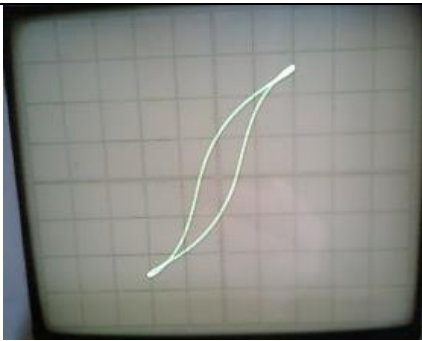
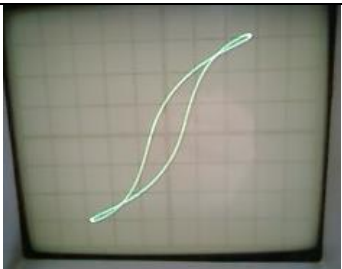
## Додаток Б

Випробувальний стенд для отримання петель гістерезису:



Приватні петлі гістерезису для обробки та розрахунку основної кривої намагнічування ДТ.1.150:

		
$U_{R1}=2,45 \text{ В};$ $U_{вх}=5,4 \text{ В};$ $V/\text{Del}=0,2$	$U_{R1}=5,3 \text{ В};$ $U_{вх}=10,6 \text{ В};$ $V/\text{Del}=0,2$	$U_{R1}=8,9 \text{ В};$ $U_{вх}=15,3 \text{ В};$ $V/\text{Del}=0,2$
		
$U_{R1}=1,5 \text{ В};$ $U_{вх}=4,3 \text{ В}$ $V/\text{Del}=0,2$	$U_{R1}=2,5 \text{ В};$ $U_{вх}=6,4 \text{ В}$ $V/\text{Del}=0,2$	$U_{R1}=3,0 \text{ В};$ $U_{вх}=7,3 \text{ В}$ $V/\text{Del}=0,2$

		
<p>UR1=3,6 B;            UBx=8,8 B;            V/Del=0,2</p>	<p>UR1=5,0 B;            UBx=10,8 B;            V/Del=0,2</p>	<p>UR1=6,6 B;            UBx=13,1 B;            V/Del=0,2</p>