

Міністерство освіти і науки України  
Український державний університет науки і технологій

Факультет «Комп'ютерних технологій і систем»

Кафедра «Автоматика та телекомунікації»

## Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи  
на здобуття освітнього ступеня «магістр»

на тему: Зворотна тягова мережа

Модель розподілу тягових струмів (комплексна)

за освітньою програмою Автоматика та автоматизація на транспорті

зі спеціальності: 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та  
робототехніка

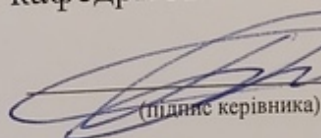
(шифр і назва спеціальності)

Виконав: студент групи АТ2321

  
(підпис студента)

/ Кирило ОРЛЕНКО /  
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

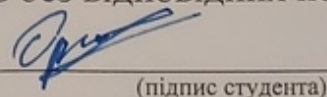
Керівник: доцент кафедри АТ

  
(підпис керівника)

/ Антон ЖУРАВЛЬОВ /  
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

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

Студент

  
(підпис студента)

Дніпро – 2025 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: Reverse traction network

A model of traction current distribution (complex)

according to educational curriculum Automatic and automation in transport

in the Specialty: 174 Automation, computer-integrated technologies and robotics  
(specialty and its code)

Done by the student of the group AT2321

/ Kirill ORLENKO /

Scientific Supervisor: associate professor

/ Anton Zhuravlov /

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

Факультет: Комп'ютерних технологій і систем  
Кафедра: Автоматика та телекомунікації  
Рівень вищої освіти: Другий (магістерський)  
Освітня програма: Автоматика та автоматизація на транспорті  
Спеціальність: 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АТ

Володимир ГАВРИЛЮК

(підпис)

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 202\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**

на кваліфікаційну роботу магістра  
(ступінь вищої освіти)

студенту Орленко Кирило Павлович  
(Прізвище, Ім'я По батькові)

**1. Тема роботи:** Зворотна тягова мережа.

Модель розподілу тягових струмів (комплексна)

Керівник роботи: Журавльов Антон Юрійович, к.т.н., б/з  
(Прізвище, Ім'я, По батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом від "05" січня 2024 р. № 20ст

**2. Строк подання студентом роботи:** 13.01.2025 р.

**3. Вихідні дані до роботи:** Нормативна документація ЕМС, типові рішення та норми з проектування систем залізничної автоматики.

Схема ділянки енергопостачання станції стикування.

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

4.1 ВСТУП

РОЗДІЛ 1. Дослідження розподілу струмів і потенціалів у рейкових мережах

4.2 РОЗДІЛ 2. Дослідження впливу системи тягового енергопостачання ст. стикування П'ятихатки - Стикова на обладнання СЦБ

4.3 РОЗДІЛ 3. Метод розрахунку рейкових кіл з нелінійними феромагнетиками в умовах впливу перешкод тягового струму. Висновки.

**5. Перелік графічного матеріалу:** розподілу тягових струмів і потенціалів у рейках, розрахункова схема РК, схема ділянки енергопостачання, струм при різній роботі ТП, схеми заміщення РК та петлі гістерезису.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	ВСТУП. Дослідження рівнів потенціалів і рівнів струмів «рейка-земля» ділянки станції стикування (в різних режимах роботи ТП).	7.10.2024	вик.
2	Огляд умов роботи РК систем СЦБ, вплив тягового струму	4.11.2024	вик.
3	Складання рівнянь для розрахунку рівнів потенціалів і струмів «рейка-земля»	9.12.2024	вик.
4	Розробка технічного рішення по підвищенню експлуатаційної надійності роботи рейкових кіл в умовах дії постійної складової тягового струму. Надання рекомендацій.	9.12.2024	вик.
5	Оформлення кваліфікаційної роботи	13.01.2025	вик.
6	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри	13.01.2025	вик.
7	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії		

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

Кирило ОРЛЕНКО

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ (підпис)

Антон ЖУРАВЛЬОВ

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

## РЕФЕРАТ

**Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра:**

64 сторінки, 20 рисунків, 10 таблиць, 13 джерел літератури.

**Об'єкт розробки** – Підвищення експлуатаційної надійності роботи РК в умовах впливу перешкод в зворотній тяговій мережі.

**Мета роботи** – Метою дослідження є аналіз розподілу струмів і потенціалів в зворотній тяговій мережі ділянки станції стикування та їх вплив на роботу РК. Розробка метода розрахунку РК з урахуванням підмагнічування ФМ.

**Методи дослідження** – методи розрахунку рейкових кіл, теорія чотирьохполюсників, експериментальні дослідження електричних та фізичних процесів в зворотній тяговій мережі та магнітопроводі ДТ.

У першому розділі проведені експериментальні та аналітичні дослідження розподілу струмів і потенціалів в зворотній тяговій мережі ділянки станції стикування.

У другому розділі наведено дослідження впливу тягового струму системи тягового енергопостачання ст. стикування на обладнання СЦБ ділянки електротяги змінного струму й заходів щодо зниження заважаючого впливу.

В третьому розділі приведений відомості про апроксимуючу модель та отримання параметрів ДТ при зміні його характеристик, розрахунок рейкового кола якої з урахуванням підмагнічування й знаходження невідомих змінних, висновок щодо впровадження методу розрахунку рейкових кіл з використанням підмагнічування феромагнетика.

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

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

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП.....</b>	<b>7</b>
<b>РОЗДІЛ 1. Дослідження розподілу струмів і потенціалів у рейкових мережах електрифікованих ділянок.....</b>	<b>9</b>
1.1. Експериментальне дослідження струмів і потенціалів рейкового кола на ділянках змінного струму при нормальному і вимушеному режимі роботи тягової підстанції.....	9
1.2. Аналітична оцінка характеру розподілу постійних струмів у рейкових мережах електрифікованих ділянок змінного струму в зоні станції стикування П'ятихатки - Стикова. ....	15
1.1.1. Нормальний режим роботи тягової підстанцій.....	18
1.1.2 Змушений режим.....	23
<b>РОЗДІЛ 2. Дослідження впливу системи тягового енергопостачання ст. П'ятихатки - Стикова на обладнання СЦБ ділянки електротяги змінного струму, що примикає до станції, й заходи щодо зниження заважаючого впливу.....</b>	<b>28</b>
2.1. Аналіз впливу режимів роботи системи тягового електропостачання ст. П'ятихатки - Стикова на обладнання СЦБ.....	28
2.2. Визначення опору ДТ.1.150 ( $f=25\text{Гц}$ ) при підмагнічуванні постійним струмом (експериментальний шлях).....	39
<b>РОЗДІЛ 3. Про метод розрахунку рейкових кіл з нелінійними феромагнетиками в умовах впливу перешкод тягового струму.....</b>	<b>46</b>
3.1. Методика розрахунку РК із нелінійними феромагнетиками.....	46
3.3. Методика розрахунку асиметрії постійного струму по величині коефіцієнта асиметрії змінного струму. ....	58
3.4. Розробка технічних заходів, по зниженню впливу системи електропостачання на пристрої СЦБ на електрифікованих ділянках змінного струму, що примикають до станції стикування «П'ятихатки - Стикова».....	59
<b>Висновок .....</b>	<b>61</b>
<b>Література.....</b>	<b>63</b>

## ВСТУП

Тема кваліфікаційної роботи є комплексна і моїм основним завданням є розробка методу протидії відмовам рейкового ланцюга при впливі перешкод від тягового струму у зворотній тяговій мережі.

На ділянках залізниць з електротягою змінного струму, що примикають до станцій стикування двох систем електротяги, при певній схемі комутації тягової мережі постійного струму в рейковій мережі виникають підвищені потенціали постійного струму «рейка-земля». Практика показує, що в цьому випадку істотно зростають постійні струми витоку в перегінні шляхи, що примикають до станції стикування, оснащені пристроями СЦБ і контактною мережею, використаними при електротязі змінного струму. Як наслідок витоку постійного струму, створюються умови для намагнічування колійних дросель-трансформаторів (ДТ) типу ДТ.1.150 (без повітряних зазорів у металопроводі) і порушення роботи коротких рейкових кіл (менш 500 м), і станційних світлофорів, що проявляються в перекритті роздільних показань світлофорів на заборонні.

Така ситуація на станції П'ятихатки – Стикова виникає при відключенні тягової підстанції постійного струму й харчуванні контактної мережі від тягової підстанції ст. Железняково й тягової підстанції (т/п) ст. Савро, що працюють паралельно на контактну мережу.

Помітимо тут, що Сніпом на проектування пристроїв СЦБ на станціях стикування передбачений захист рейкових кіл ділянки електротяги змінного струму, розташовуваних на відстані менш 10 км від станції стикування. Досвід, тим часом, показали, що рейкові кола ст. Зелена Одеської залізниці, вилученої від т/п постійного струму ст. П'ятихатки майже на 20 км, працювали хитливо, що спорадично супроводжувалося перекриттями станційних світлофорів (у моменти максимальних постійних струмів витоку й тягових струмів).

При цьому перекриття прохідних світлофорів на перегоні практично не спостерігалось, що пояснюється істотно більшою довжиною перегінних РК, у порівнянні з довжиною станційних РК, а також великою тимчасовою інерцією пристроїв декодування сигналів автоблокування. Коефіцієнт асиметрії перегінних РК менше, ніж станційних.

З викладеного видно, що підвищення завадостійкості рейкових кіл систем СЦБ в умовах впливу зворотнього постійного тягового струму є актуальною науково-технічною проблемою.

У звіті по темі НДР [5] проведений аналіз впливу режимів роботи системи тягового електропостачання в зоні ст. стикування П'ятихатки - Стикова на роботу рейкових кіл систем СЦБ при електротязі змінного струму; наведені результати експериментальних вимірів рівнів потенціалів і тягового постійного струму при створенні найбільш важких режимів роботи тягової мережі; розглянуті отримані в процесі досліджень технічні заходи щодо зниження впливу системи тягового електропостачання на пристрої СЦБ на електрифікованих ділянках змінного струму, що прилягають до ст. стикування П'ятихатки - Стикова.

Слід зазначити, що результати НДР [5], можуть бути використані й в інших випадках стикування двох систем електричної тяги й захисту систем СЦБ від впливу зворотнього постійного струму; крім того, виключення шляхів розтікання цього струму в зону електротяги змінного струму, дозволить (на значну до 30 км відстань) захистити від електричної корозії опори контактної мережі, металеві елементи верхньої будови колії й рейки. Помітимо тут, що поширення тональних рейкових кіл на ділянках доріг України поліпшить роботу систем СЦБ, але повного виключення негативного впливу тягового постійного струму на рейкові кола (насичення шляхових трансформаторів) і електрокорозію металевих споруджень і елементів верхньої будови колії очікувати не слід.

## РОЗДІЛ 1. Дослідження розподілу струмів і потенціалів у рейкових мережах електрифікованих ділянок.

### 1.1. Експериментальне дослідження струмів і потенціалів рейкового кола на ділянках змінного струму при нормальному і вимушеному режимі роботи тягової підстанції

Експериментальна оцінка рівня потенціалів «рейка – земля» здійснювалася шляхом вимірювання та реєстрації потенціалів і струмів в західних горловинах станції «П'ятихатки – Стикова» і Яковлівка рис. 1.1. З метою оцінки розподілу струмів і потенціалів в рейкових мережах при нормальному і вимушеному режимах роботи тягових підстанцій були проведені вимірювання параметрів тягових підстанцій Савро, Железняково і П'ятихатки.

Загальна витрата електроенергії тягових підстанцій за добу (11.2022р.) наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Загальна витрата електроенергії тягових підстанцій

<i>Підстанція:</i>	<i>П'ятихатки</i>	<i>Железняково</i>	<i>Савро</i>
<i>S, кВт·ч</i>	78948	88704	17090
<i>U, кВ (вхід)</i>	35,4	35,0	37,0
<i>U, кВ (шини)</i>	3,3	3,4	3,5
<i>I, А (вхід)</i>	32,5	103	19,2
<i>I, А (шини)</i>	488	1545	289

Загальна витрата електроенергії тягової підстанції в вимушеному режимі (тягова підстанція П'ятихатки відключена) за період з 12.00 годин до 16.00 годин (11.2022р.) представлена в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Загальна витрата електроенергії підстанцій в вимушеному режимі

<i>Підстанція:</i>	<i>Савро</i>	<i>Железняково</i>
<i>S, кВт·ч</i>	-	22134
<i>U, кВ (вхід)</i>	37,0	34,9
<i>U, кВ (шини)</i>	3,56	3,4
<i>I, А (шини)</i>	580	1590

У 2013 році ТП Савро була відключена і її навантаження сприйняла на себе ТП Завяловка.

Загальна витрата електроенергії ТП наведена в табл. 1.3.

Таблиця 1.3 – Загальна витрата електроенергії підстанцій при відключені ТП Савро

<i>Підстанція:</i>	<i>П'ятихатки</i>	<i>Железняково</i>	<i>Завяловка</i>
<i>U, кВ (шини)</i>	33	34,6	34,8
<i>S, кВт·ч (жовтень)</i>	2278596	2680289	692599
<i>S, кВт·ч (14.30-16.47 17.11.13.)</i>	63383	101476	-

У табл. 1.1 – табл. 1.3 наведені витрати електроенергії на тягу поїздів, середня напруга на шинах тягових підстанцій і середні струми тягових підстанцій. Наведені витрати електроенергії на тягу поїздів говорять про те, що струмові навантаження тягових підстанцій в 2022 році в порівнянні з 2013 роком практично не змінилися. Вплив системи тягового електропостачання постійного струму на роботу пристроїв СЦБ на електрифікованих ділянках

змінного струму в зоні станції стикування «П'ятихатки – стикова» залишилася колишнім, що підтвердили результати вимірювань струмів і потенціалів рейок на перегоні між станцією стикування «П'ятихатки – стикова» і станцією Яковлівка.

Вимірювання і реєстрація струмів та потенціалів в рейкових колах здійснювалася вимірювальним приладом М – 231 і вимірювальні шунти, АЦП типу L-Card E-14-140 з ЕОМ.

Потенціали «рейка–земля» виміряний приладом М – 231 в західній горловині станції «П'ятихатки – стикова» 11.2022 р, наведені в табл. 1.4, а в західній горловині станції Яковлівка в табл. 1.5.

Таблиця 1.4 – Зміна потенціали «рейка–земля» станції «П'ятихатки – стикова»

<i>t, хв 14.21...14.30</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>U<sub>p</sub>, В</i>	18	12	13	14	16	18	18	17	18	17
<i>U<sub>p</sub> ср, В</i>	16,1									
<i>t, хв 14.31...14.40</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>U<sub>p</sub>, В</i>	18	15	14	10	12	5	7	10	11	10
<i>U<sub>p</sub> ср, В</i>	11,2									
<i>t, хв 14.41...14.50</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>U<sub>p</sub>, В</i>	9	6	10	12	11	10	13	12	18	10
<i>U<sub>p</sub> ср, В</i>	11,1									
<i>t, хв 14.51...15.00</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>U<sub>p</sub>, В</i>	17	20	22	20	20	20	20	22	23	15
<i>U<sub>p</sub> ср, В</i>	19.9									

Таблиця 1.5 – Зміна потенціали «рейка–земля» станції Яковлівка

<i>t, хв 15.51...16.00</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>U<sub>p</sub>, В</i>	13	8	11	13	20	21	20	14	5	7

<b><math>U_p</math> ср, В</b>	<b>13,2</b>									
<b><math>t</math>, хв 16.01...16.10</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b><math>U_p</math>, В</b>	12	15	10	10	5	10	11	16	10	15
<b><math>U_p</math> ср, В</b>	<b>11,4</b>									
<b><math>t</math>, хв 16.11...16.20</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b><math>U_p</math>, В</b>	10	12	17	16	20	10	4	1	12	10
<b><math>U_p</math> ср, В</b>	<b>11,2</b>									

Характерні приклади вимірювання струмів і потенціалів рейок в момент відключення ТП П'ятихатки наведені на рис. 1.1 – рис. 1.3.

На рис. 1.1 приведена форма струму в середній точці дросельного пункту (ДП), виміряного в західній горловині станції «П'ятихатки – стикова». На рис. 1.2 наведено спектральний склад цього струму. Максимальне значення тягового постійного струму складала 125 А, максимальне значення, на колію, тягового змінного струму складала 81 А.

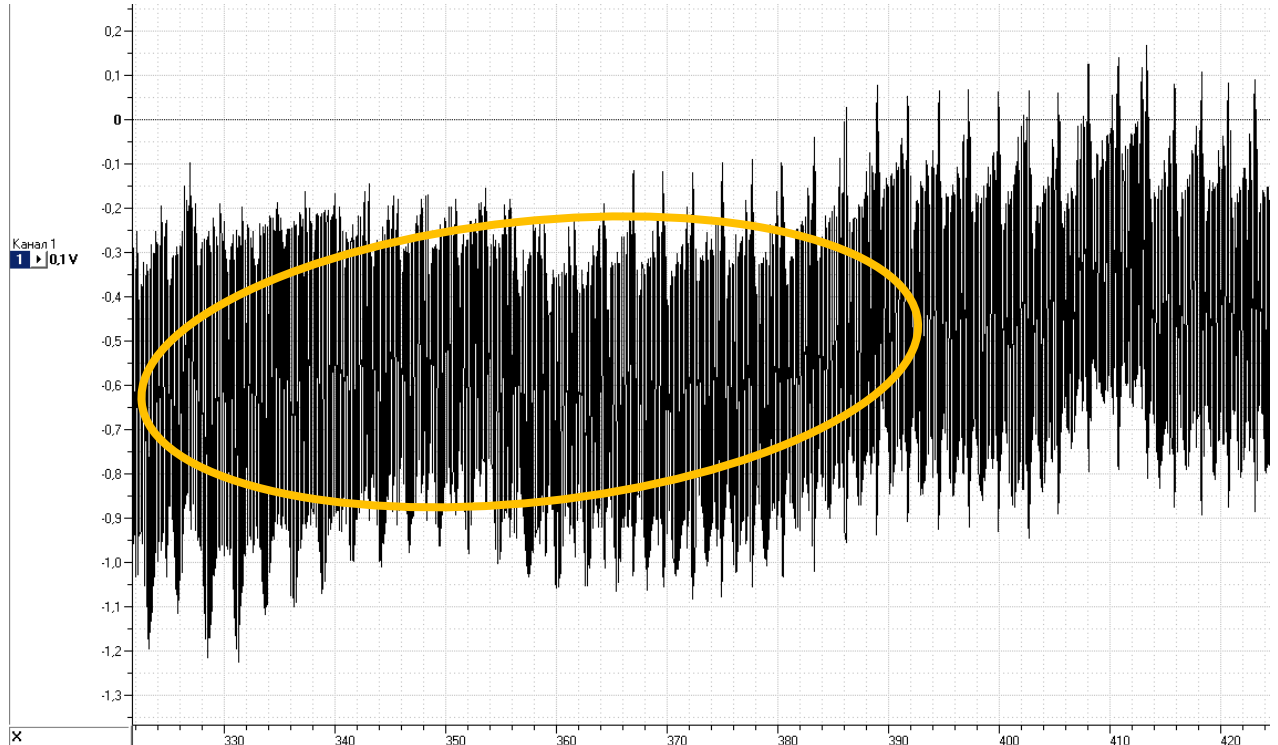


Рисунок 1.1 – Викопіювання форми тягового струму в середній точці ДП біля вхідного світлофора західній горловині станція стикування

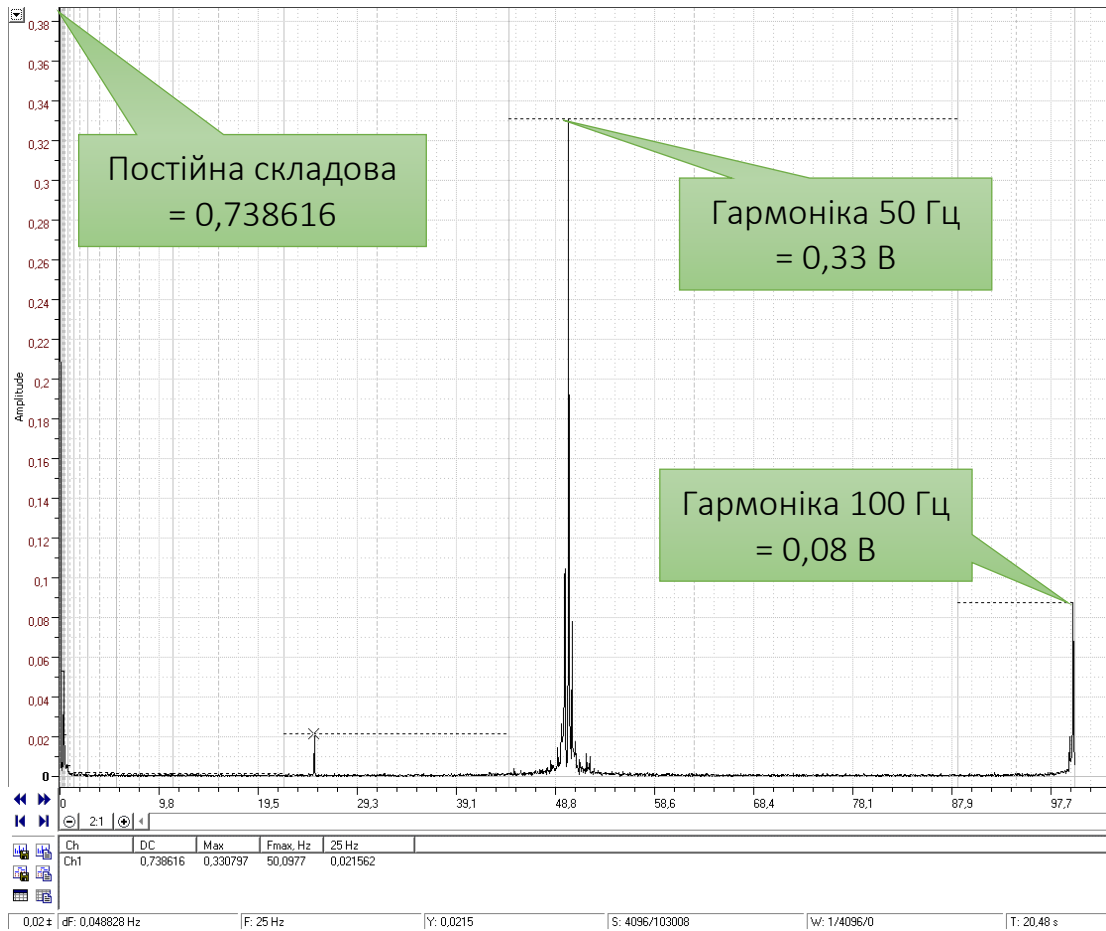


Рисунок 1.2 – Спектр тягового струму в середній точці ДП

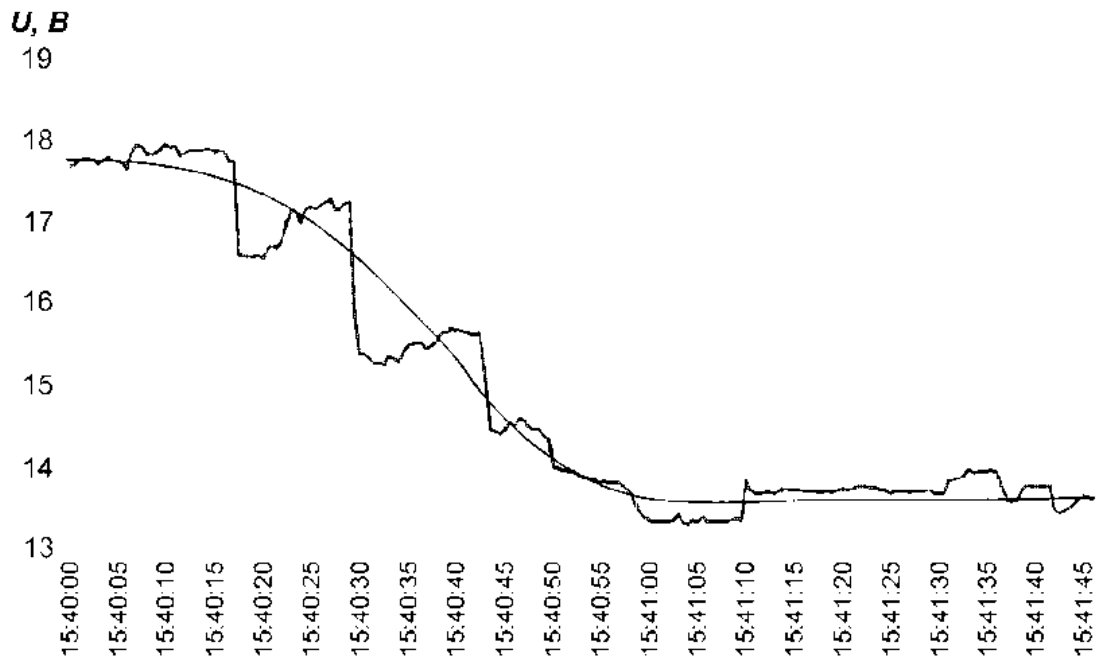


Рисунок 1.3 – Вимірювання потенціал «рейка-земля» біля вхідного світлофора західній горловині станції Яковлівка

На рис. 1.3 наведено постійний потенціал «рейка–земля», вимірюваний в західній горловині станції Яковлівка.

Максимальне значення потенціалу постійного струму склало  $\approx 19$  В.

Проведені виміри підтвердили результати розрахунків і дозволяють зробити висновок, що тягові постійні струми досить далеко проникають на полігон електрифікованих ділянок змінного струму, при асиметрії (поздовжньої і поперечної) параметрів рейкового кола (опір рейок і перехідний опір «рейка – земля») можуть підмагнічувати магнітопроводи колійних дросель – трансформаторів типу ДТ-1-150, які знаходяться в глибині полігону електротяги змінного струму, що є причиною збоїв в роботі пристроїв СЦБ.

У зв'язку з цим для забезпечення нормальної роботи пристроїв СЦБ на електрифікованих ділянках змінного струму, що примикають до станції стикування необхідно:

- 1. Для обмеження впливу тягових постійних струмів на рейкові кола електрифікованої ділянки змінного струму, профілактичні роботи на ТП П'ятихатки, з повним її відключенням необхідно проводити в весняний – осінній період при зниженому перехідному опорі «рейка – земля»;*
- 2. Для запобігання корозійного пошкодження залізобетонних опор і фундаментів контактної мережі і елементів залізничної колії незалежно від опору розтікання опор на полігоні контактної мережі змінного струму необхідно виконати такі ж заходи як і на електрифікованих ділянках постійного струму (в індивідуальне заземлення опор встановити іскрові проміжки, в групові заземлення встановити іскрові проміжки і діодні заземлювачі, ізолювати хомут і закладні деталі від тіла опор і т. п.).*

3. Для усунення розтікання тягових постійних струмів в рейкові кола електрифікованої ділянки змінного струму необхідно не з'єднувати нульові точки дросель-трансформаторів дросельного пункту вхідного світлофора станції стикування. У цьому випадку, особливо при коротких замиканнях в тяговій мережі, можлива поява небезпечних потенціалів на ізолюючому стику, який можна знизити включенням у розтин між нульовими точками дросель-трансформаторів силових захисних комутуючих блоків (СЗКБ).
4. Регулювання рейкових кіл з урахуванням, можливого, впливу постійного тягового струму як при витіканні від станції стикування, так і при асиметрії рейкової лінії, коли відбувається підмагнічування сердечника ДТ.

### **1.2. Аналітична оцінка характеру розподілу постійних струмів у рейкових мережах електрифікованих ділянок змінного струму в зоні станції стикування П'ятихатки - Стикова.**

Характер розподілу постійних струмів у тягових мережах електрифікованих ділянок змінного струму в зоні станції стикування П'ятихатки - Стикова здійснювалася шляхом розрахунку на ЕОМ [2, 5]. Розрахунок проводився при нормальному й змушеному режимі роботи підстанції П'ятихатки. Схема ділянки представлена на рис. 1.4.

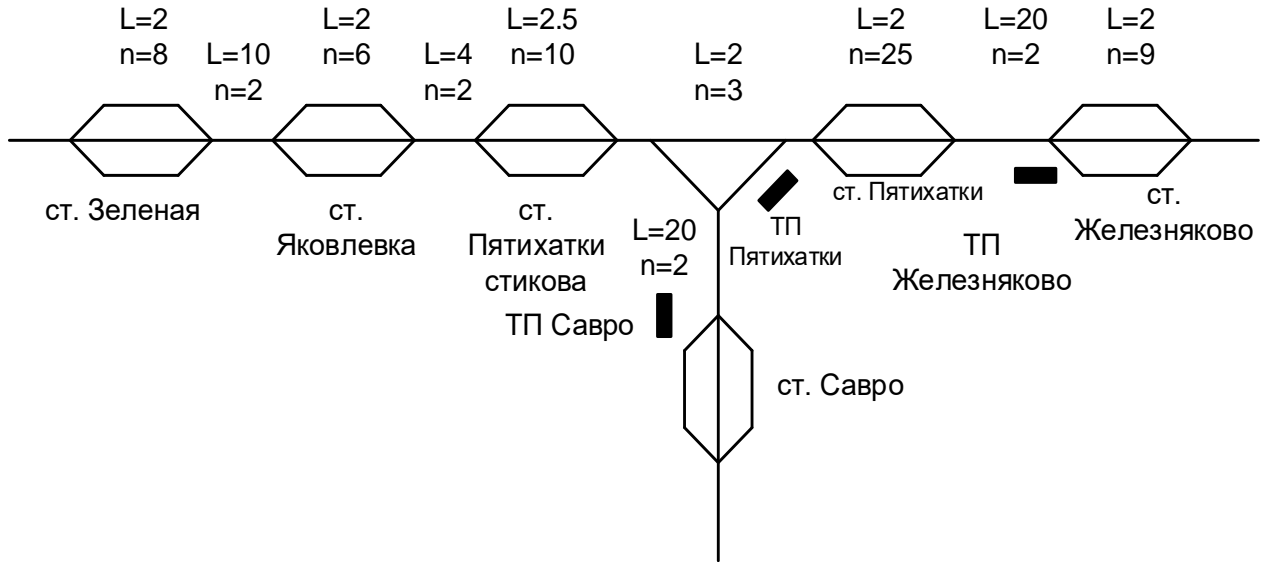


Рисунок 1.4 – Схема ділянки

Для розрахунку струмів і потенціалів становимо розрахункову схему, у якій поєднуємо тягові підстанції Железнякаво й Савро. Розглянемо миттєву схему, у якій струм електровоза  $I_1 = 300$  А, струм електровоза  $I_2 = 2022$  А.

Для нормального режиму роботи тягових підстанцій становимо миттєву схему рис. 1.5.

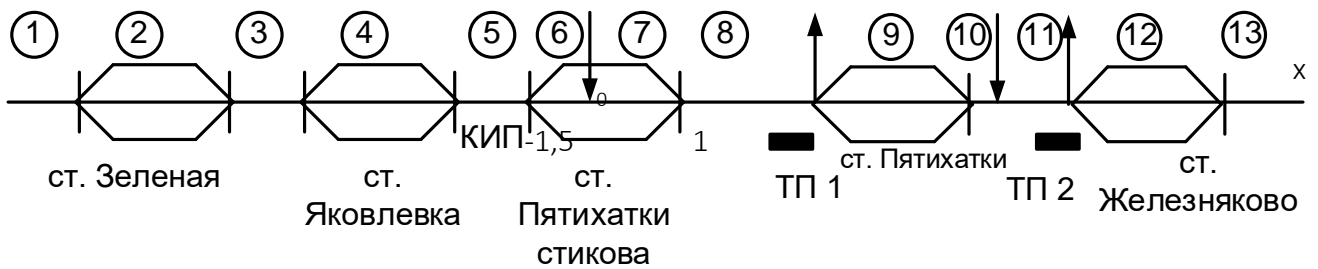


Рисунок 1.5 – Розрахункова схема. Нормальний режим

Становимо систему рівнянь для струмів і потенціалів рейкової мережі:

$$U_{pxi} = A_i e^{kx} + B_i e^{-kx}; \tag{1.1}$$

$$I_{pxi} = -\frac{1}{Rrvi} (A_i * e^{kx} - B_i * e^{-kx}), \tag{1.2}$$

де  $i$  - номер зони;

$Rrvi$  – хвильовий опір рейкової мережі, Ом,

$$R_{rvi} = \frac{\sqrt{r_p * r_n}}{n_i}, \quad (1.3)$$

де  $R_p$  – питомий поздовжній опір одноколійної ділянки рейкової мережі, Ом/км;

$R_n$  – питомий перехідний опір «рейка – земля» одноколійної ділянки, Ом· км;

до - коефіцієнт поширення рейкової мережі, 1/км;

$$k = \sqrt{\frac{R_p}{R_n}}, \quad (1.4)$$

де  $A_i, B_i$  – постійні коефіцієнти;

$x$  - поточна координата.

Розрахунок проводимо для двох режимів роботи тягової мережі:

**нормальному** - всі підстанції включені;

**змушеному** - підстанція П'ятихатки відключена. Питомий перехідний опір «рейка-земля» приймаємо мінімально припустиме 0,25 Ом км у сиру погоду й 10 Ом км у дуже суху погоду або при сильних морозах.

Розраховуємо хвильовий опір рейкової мережі для кожної зони.

При  $R_{n1} = 0.25$  Ом км:

$$k = \sqrt{\frac{0.0154}{0.25}} = 0.248 \text{ 1/км};$$

$$R_{rv1} = R_{rv3} = R_{rv5} = R_{rv10} = R_{rv11} = R_{rv13} = \frac{\sqrt{0.0154 * 0.25}}{2} = 0.031 \text{ Ом};$$

$$R_{rv2} = \frac{\sqrt{0.0154 * 0.25}}{8} = 0.00776 \text{ Ом};$$

$$R_{rv2} = \frac{\sqrt{0.0154 * 0.25}}{6} = 0.0103 \text{ Ом};$$

$$R_{rv6} = R_{rv7} = \frac{\sqrt{0.0154 * 0.25}}{10} = 0.0062 \text{ Ом};$$

$$Rrv8 = \frac{\sqrt{0.0154 * 0.25}}{3} = 0.0207 \text{ Ом};$$

$$Rrv9 = \frac{\sqrt{0.0154 * 0.25}}{25} = 0.00248 \text{ Ом};$$

$$Rrv12 = \frac{\sqrt{0.0154 * 0.25}}{9} = 0.00689 \text{ Ом};$$

При  $R_{n2} = 10 \text{ Ом} \cdot \text{км}$ :

$$k = \sqrt{\frac{0.0154}{10}} = 0.039 \text{ 1/км};$$

$$Rrv1 = Rrv3 = Rrv5 = Rrv10 = Rrv11 = Rrv13 = \frac{\sqrt{0.0154 \cdot 10}}{2} = 0.196 \text{ Ом};$$

$$Rrv2 = \frac{\sqrt{0.0154 \cdot 10}}{8} = 0.049 \text{ Ом};$$

$$Rrv6 = Rrv7 = \frac{\sqrt{0.0154 \cdot 10}}{10} = 0.039 \text{ Ом};$$

$$Rrv8 = \frac{\sqrt{0.0154 \cdot 10}}{3} = 0.131 \text{ Ом};$$

$$Rrv9 = \frac{\sqrt{0.0154 \cdot 10}}{25} = 0.016 \text{ Ом};$$

$$Rrv12 = \frac{\sqrt{0.0154 \cdot 10}}{9} = 0.044 \text{ Ом};$$

### 1.1.1. Нормальний режим роботи тягової підстанції

Для визначення коефіцієнтів  $A_i$ ,  $B_i$ , задаємося граничними умовами:

Г1: при  $x = -\infty$ ,  $U_{px1}=0$ ;

Г2: при  $x = \infty$ ,  $U_{px13}=0$ ;

Г3: при  $x = 0$ ,  $U_{px6}= U_{px7}$ ;

Г4: при  $x = 3$ ,  $U_{px8}= U_{px9}$ ;

Г5: при  $x = 20,5$ ,  $U_{px10}= U_{px11}$ ;

- Г6: при  $x = 26$ ,  $U_{px11} = U_{px12}$ ;  
 Г7: при  $x = 0$ ,  $I_{px7} - I_{px6} = I$ ;  
 Г8: при  $x = 3$ ,  $I_{px8} - I_{px9} = I_1$ ;  
 Г9: при  $x = 20,5$ ,  $I_{px11} - I_{px10} = 2I$ ;  
 Г10: при  $x = 26$ ,  $I_{px11} - I_{px12} = I_2$ ;  
 Г11: при  $x = -19,5$ ,  $I_{px1} = I_{px2}$ ;  
 Г12: при  $x = -17,5$ ,  $I_{px2} = I_{px3}$ ;  
 Г13: при  $x = -7,5$ ,  $I_{px3} = I_{px4}$ ;  
 Г14: при  $x = -5,5$ ,  $I_{px4} = I_{px5}$ ;  
 Г15: при  $x = -1,5$ ,  $I_{px5} = I_{px6}$ ;  
 Г16: при  $x = 1$ ,  $I_{px7} = I_{px8}$ ;  
 Г17: при  $x = 6$ ,  $I_{px9} = I_{px10}$ ;  
 Г18: при  $x = 28$ ,  $I_{px12} = I_{px13}$ ;  
 Г19: при  $x = -19,5$ ,  $U_{px1} = U_{px2}$ ;  
 Г20: при  $x = -17,5$ ,  $U_{px2} = U_{px3}$ ;  
 Г21: при  $x = -7,5$ ,  $U_{px3} = U_{px4}$ ;  
 Г22: при  $x = -5,5$ ,  $U_{px4} = U_{px5}$ ;  
 Г23: при  $x = -1,5$ ,  $U_{px5} = U_{px6}$ ;  
 Г24: при  $x = 1$ ,  $U_{px7} = U_{px8}$ ;  
 Г25: при  $x = 6$ ,  $U_{px9} = U_{px10}$ ;  
 Г26: при  $x = 28$ ,  $U_{px12} = U_{px13}$ .

Підставивши граничні умови в рівняння (1.1) і (1.2), одержимо систему рівнянь, вирішивши яку знайдемо коефіцієнти  $A_i$ ,  $B_i$ .

$$B_1 = 0$$

$$A_{13} = 0$$

$$A_6 + B_6 - A_7 - B_7 = 0$$

$$A_8 e^{3k} + B_8 e^{-3k} - A_9 \cdot e^{3k} - B_9 \cdot e^{-3k} = 0$$

$$A_{10} \cdot e^{20,5k} + B_{10} \cdot e^{-20,5k} - A_{11} \cdot e^{20,5k} - B_{11} \cdot e^{-20,5k} = 0$$

$$A_{11} \cdot e^{26k} + B_{11} \cdot e^{-26k} - A_{12} \cdot e^{26k} - B_{12} \cdot e^{-26k} = 0$$

$$\frac{-1}{Rrv7} \cdot A7 + \frac{1}{Rrv7} \cdot B7 + \frac{1}{Rrv6} \cdot A6 - \frac{1}{Rrv6} \cdot B6 = 300$$

$$\frac{-e^{3k}}{Rrv8} \cdot A8 + \frac{e^{-3k}}{Rrv8} \cdot B8 + \frac{e^{3k}}{Rrv9} \cdot A9 - \frac{e^{-3k}}{Rrv9} \cdot B9 = 488$$

$$\frac{-e^{20.5k}}{Rrv11} \cdot A_{11} + \frac{e^{-20.5k}}{Rrv11} \cdot B_{11} + \frac{e^{20.5k}}{Rrv10} \cdot A_{10} - \frac{e^{-20.5k}}{Rrv10} \cdot B_{10} = 2.022 \times 10^3$$

$$\frac{-e^{26k}}{Rrv11} \cdot A_{11} + \frac{e^{-26k}}{Rrv11} \cdot B_{11} + \frac{e^{26k}}{Rrv12} \cdot A_{12} - \frac{e^{-26k}}{Rrv12} \cdot B_{12} = 1.834 \times 10^3$$

$$\frac{-e^{-19.5k}}{Rrv1} \cdot A1 + \frac{e^{19.5k}}{Rrv1} \cdot B1 + \frac{e^{-19.5k}}{Rrv2} \cdot A2 - \frac{e^{19.5k}}{Rrv2} \cdot B2 = 0$$

$$\frac{-e^{-17.5k}}{Rrv2} \cdot A2 + \frac{e^{17.5k}}{Rrv2} \cdot B2 + \frac{e^{-17.5k}}{Rrv3} \cdot A3 - \frac{e^{17.5k}}{Rrv3} \cdot B3 = 0$$

$$\frac{-e^{-7.5k}}{Rrv3} \cdot A3 + \frac{e^{7.5k}}{Rrv3} \cdot B3 + \frac{e^{-7.5k}}{Rrv4} \cdot A4 - \frac{e^{7.5k}}{Rrv4} \cdot B4 = 0$$

$$\frac{-e^{-5.5k}}{Rrv4} \cdot A4 + \frac{e^{5.5k}}{Rrv4} \cdot B4 + \frac{e^{-5.5k}}{Rrv5} \cdot A5 - \frac{e^{5.5k}}{Rrv5} \cdot B5 = 0$$

$$\frac{-e^{-1.5k}}{Rrv5} \cdot A5 + \frac{e^{1.5k}}{Rrv5} \cdot B5 + \frac{e^{-1.5k}}{Rrv6} \cdot A6 - \frac{e^{1.5k}}{Rrv6} \cdot B6 = 0$$

$$\frac{-e^k}{Rrv7} \cdot A7 + \frac{e^{-1k}}{Rrv7} \cdot B7 + \frac{e^{1k}}{Rrv8} \cdot A8 - \frac{e^{-1k}}{Rrv8} \cdot B8 = 0$$

$$\frac{-e^{6k}}{Rrv9} \cdot A9 + \frac{e^{-6k}}{Rrv9} \cdot B9 + \frac{e^{6k}}{Rrv10} \cdot A_{10} - \frac{e^{-6k}}{Rrv10} \cdot B_{10} = 0$$

$$\frac{-e^{28k}}{Rrv12} \cdot A_{12} + \frac{e^{-28k}}{Rrv12} \cdot B_{12} + \frac{e^{28k}}{Rrv13} \cdot A_{13} - \frac{e^{-28k}}{Rrv13} \cdot B_{13} = 0$$

$$A1 \cdot e^{-19.5k} + B1 \cdot e^{19.5k} - A2 \cdot e^{-19.5k} - B2 \cdot e^{19.5k} = 0$$

$$A2 \cdot e^{-17.5k} + B2 \cdot e^{17.5k} - A3 \cdot e^{-17.5k} - B3 \cdot e^{17.5k} = 0$$

$$A3 \cdot e^{-7.5k} + B3 \cdot e^{7.5k} - A4 \cdot e^{-7.5k} - B4 \cdot e^{7.5k} = 0$$

$$A4 \cdot e^{-5.5 \cdot k} + B4 \cdot e^{5.5 \cdot k} - A5 \cdot e^{-5.5 \cdot k} - B5 \cdot e^{5.5 \cdot k} = 0$$

$$A5 \cdot e^{-1.5 \cdot k} + B5 \cdot e^{1.5 \cdot k} - A6 \cdot e^{-1.5 \cdot k} - B6 \cdot e^{1.5 \cdot k} = 0$$

$$A7 \cdot e^{1 \cdot k} + B7 \cdot e^{-1 \cdot k} - A8 \cdot e^{1 \cdot k} - B8 \cdot e^{-1 \cdot k} = 0$$

$$A9 \cdot e^{6 \cdot k} + B9 \cdot e^{-6 \cdot k} - A10 \cdot e^{6 \cdot k} - B10 \cdot e^{-6 \cdot k} = 0$$

$$A12 \cdot e^{28 \cdot k} + B12 \cdot e^{-28 \cdot k} - A13 \cdot e^{28 \cdot k} - B13 \cdot e^{-28 \cdot k} = 0$$

Систему рівнянь вирішимо за допомогою MathCad.

У розрахунку прийняті наступні позначення:

$R_p$  - питомий поздовжній опір одноколіїної ділянки рейкової мережі,  
Ом/км,

$R_n$  - питомий перехідний опір одноколіїної ділянки рейкової мережі,  
Ом·км.

$R_{rv}$  – хвильовий опір рейкової мережі, Ом.

Підставивши коефіцієнти  $A_i$ ,  $B_i$  у рівняння (1.1) і (1.2), знайдемо струми й потенціали в рейках. Результати розрахунків заносимо в табл.1.6.

Приклад розрахунку для  $R_{n1} = 0.25$  Ом·км:

$$U_{px7} = -0.127 e^{0.2480} + 1.175 e^{-0.2480} = 1.047 \text{ В},$$

$$I_{px7} = -\frac{1}{0.0062} (-0.127 e^{0.2480} - 1.175 e^{-0.2480}) = 209.821 \text{ А}.$$

Приклад розрахунку для  $R_{n2} = 10$  Ом·км:

$$U_{px7} = -0.764 e^{0.2480} + 8.65 e^{-0.2480} = 7.887 \text{ В},$$

$$I_{px7} = -\frac{1}{0.039} (-0.764 e^{0.2480} - 8.65 e^{-0.2480}) = 239.89 \text{ А}.$$

Таблиця 1.6 - Струми й потенціали в рейках

X, км	Нормальний режим R=0,25 Ом		Нормальний режим R=10 Ом	
	U <sub>рх</sub> , В	I <sub>рх</sub> , А	U <sub>рх</sub> , В	I <sub>рх</sub> , А
1	2	3	4	5

-21,5	0,004	-0,131	3,5	-17,7
-20,5	0,005	-0,168	3,6	-18,4
-19,5	0,006	-0,21	3,7	-19,2
-18,5	0,007	-0,44	3,8	-22,2
-17,5	0,008	-0,69	3,9	-25,3
-15,5	0,02	-0,91	4,2	-26,9
-12,5	0,05	-1,71	4,9	-29,7
-9,5	0,1	-3,52	5,6	-32,8
-7,5	0,17	-5,75	6,1	-35,2
-6,5	0,19	-10,23	6,2	-39
-5,5	0,23	-15,3	6,3	-42
-3,5	0,5	-21,1	7	-45,4
-1,5	0,9	-32,1	7,7	-48,3
-1	0,94	-50,6	7,8	-52
0	1	-90,1	7,9	-60
0	1,04	209,8	7,9	239,8
0,5	0,89	190,4	7,7	235,9
1	0,75	173,9	7,5	232
2	-0,12	170	6,3	230
3	-1,01	177	5	228
3	-1,01	-310,9	5	-259
4,5	-0,78	-177,3	5,4	-279
6	-0,67	-68,6	5,6	-300
12	2,9	-114	19,8	-315
17	11	-362	32,4	-241
20,5	26,5	-857	41	-367
20,5	26,5	1165	41	1654
23	7,9	830	10,2	1641
25	-4,4	803	-14	1642
26	-10,8	864	-27,6	1647
26	-10,8	-969,7	-27,6	-187
27	-9,47	-606,5	-27,3	-162
28	-8,7	-208,9	-27	-138
29	-6,7	-219	-26	-132
30	-5,3	-170,9	-25	-127

### 1.1.2 Змушений режим

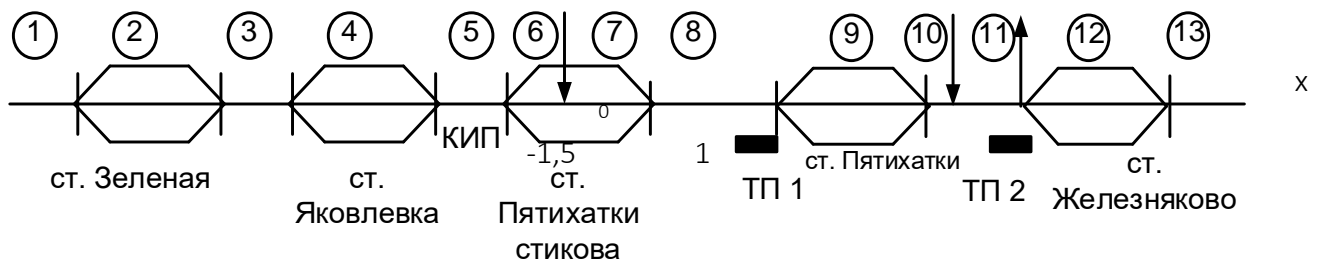


Рисунок 1.6 – Розрахункова схема. Змушений режим

Для визначення коефіцієнтів  $A_i$ ,  $B_i$ , задаємося граничними умовами. Для змушеного режиму (рис. 1.6) граничні умови такі ж, як і для нормального режиму, крім умови Г8, що буде виглядати в такий спосіб:

Г8: при  $x = 3$ ,  $I_{rx8} - I_{rx9} = 0$ .

Тоді рівняння (1.2) запишемо у вигляді:

$$\frac{-e^{3k}}{Rrv8} \cdot A8 + \frac{e^{-3k}}{Rrv8} \cdot B8 + \frac{e^{3k}}{Rrv9} \cdot A9 - \frac{e^{-3k}}{Rrv9} \cdot B9 = 0.$$

Вирішивши систему рівнянь, знайдемо коефіцієнти  $A_i$ ,  $B_i$  і підставивши їх у рівняння (1.1) і (1.2) знайдемо значення струмів і потенціалів у рейках в змушеному режимі.

Приклад розрахунку для  $R_{n1} = 0.25 \text{ Ом} \cdot \text{км}$ :

$$U_{px7} = 0.283e^{0.0390} + 1.299e^{-0.0390} = 1.583 \text{ В},$$

$$I_{px7} = -\frac{1}{0.0062} (0.283e^{0.0390} - 1.299e^{-0.0390}) = 163.725 \text{ А}.$$

для  $R_{n2} = 10 \text{ Ом} \cdot \text{км}$ :

$$U_{px7} = 9.1e^{0.480} + 13.97e^{-0.2480} = 23.085 \text{ В},$$

$$I_{px7} = -\frac{1}{0.039} (9.1e^{0.0390} - 13.97e^{-0.0390}) = 124.06 \text{ А}.$$

Результати розрахунків заносимо в табл.1.7.

Таблиця 1.7 - Струми й потенціали в рейках у змушеному режимі

X, км	Змушений режим R=0,25 Ом		Змушений режим R=10 Ом	
	U <sub>рх</sub> , В	I <sub>рх</sub> , А	U <sub>рх</sub> , В	I <sub>рх</sub> , А
1	2	3	4	5
-21,5	0,006	-0,19	10,2	-52
-20,5	0,007	-0,25	10,6	-54
-19,5	0,01	-0,32	11	-56
-18,5	0,011	-0,66	11,1	-65
-17,5	0,013	-1,2	11,2	-74
-15,5	0,03	-1,3	12	-78
-12,5	0,07	-2,5	14	-86
-9,5	0,16	-5,3	16	-96
-7,5	0,2	-8,6	18	-103
-6,5	0,29	-15,4	18,3	-114
-5,5	0,34	-23,1	18,6	-125
-3,5	0,76	-31,9	20	-132
-1,5	1,3	-48,6	22	-141
-1	1,4	-76,5	22	-152
0	1,5	-136	23	-175
0	1,5	163	23	124
0,5	1,4	133	22,9	112
1	1,3	104	22,9	101
2	0,8	91	22,4	94
3	0,4	83	21,9	87
3	0,4	83	21,9	87
4,5	0,38	23	21,9	5
6	0,38	-33	21,9	-76
12	3	-103	26	-105
17	10	-350	30	-133
20,5	25	-833	34	-156
20,5	25	1188	34	1865
23	6	873	-1,1	1857
25	-6,5	873	-29	1863
26	-13,5	953	-44	1871
26	-13,5	-1217	-44	-299
27	-11	-760	-43,7	-259

28	-10	-352	-43,2	-220
29	-8,5	-274	-41	-212
30	-6,6	-214	-40	-204

Розрахунки показують, що досить більші постійні струми натікають на дросель - трансформатори станції Зелена, розташованої на відстані близько 20 км від станції стикування П'ятихатки - стикова (рис. 1.7). А при відключенні тягової підстанції П'ятихатки тягові постійні струми різко зростають особливо при високому перехідному опорі «рейка-земля» у зимовий період при сильних морозах і в літній період при сухій і жаркій погоді (рис. 1.8). За рахунок поздовжньої й поперечної асиметрії рейкових кіл викликані станом шляхових з'єднувачів струмопровідних стиків, зусиллям затягування болтів шляхових неполадок, станом заземлення опір контактної мережі й інших споруджень, заземлених на рейки, відбувається підмагнічування магнітопроводів колійних ДТ типу ДТ.1.150, що може привести до збою в роботі пристроїв СЦБ.

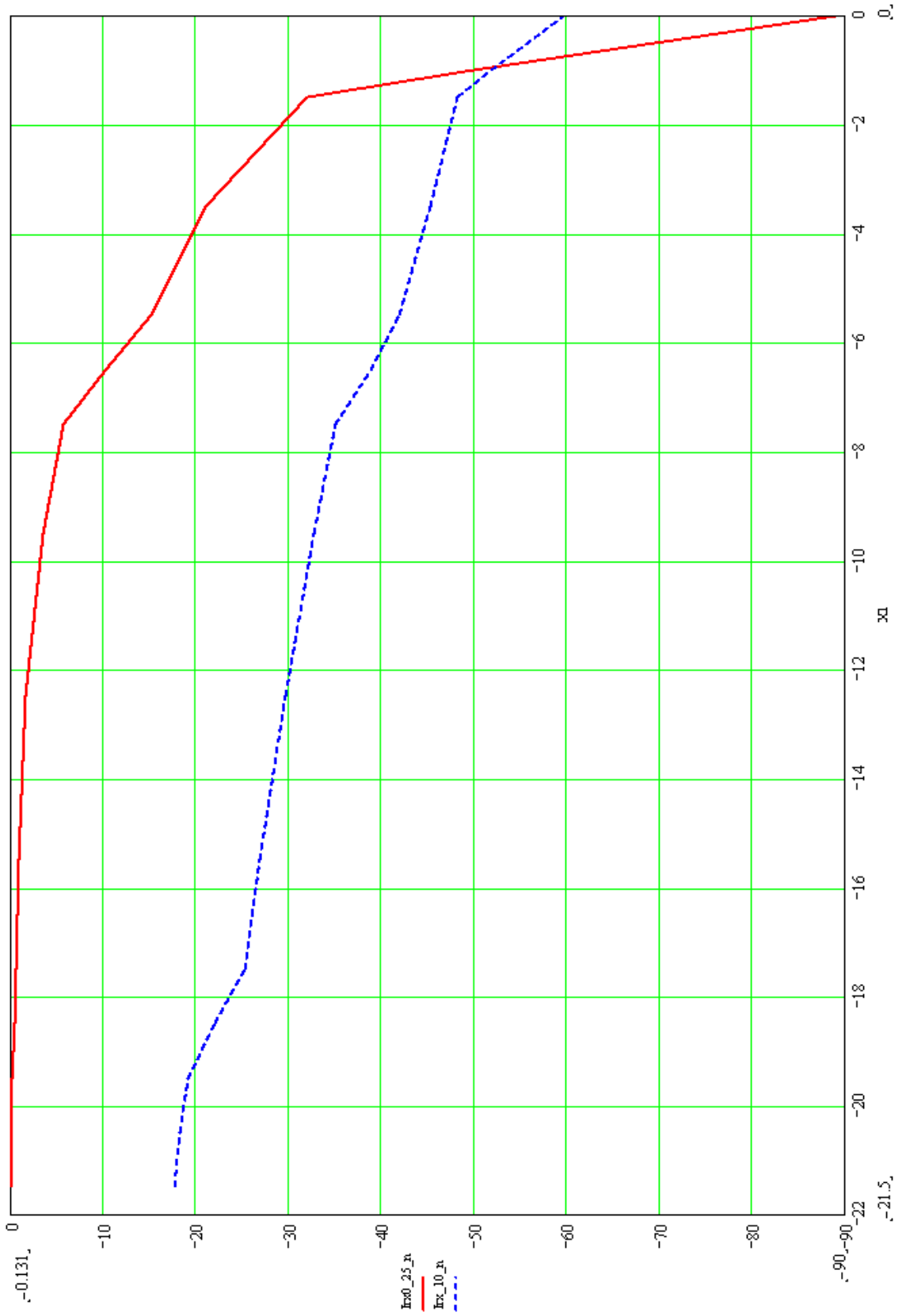


РИСУНОК 1.7

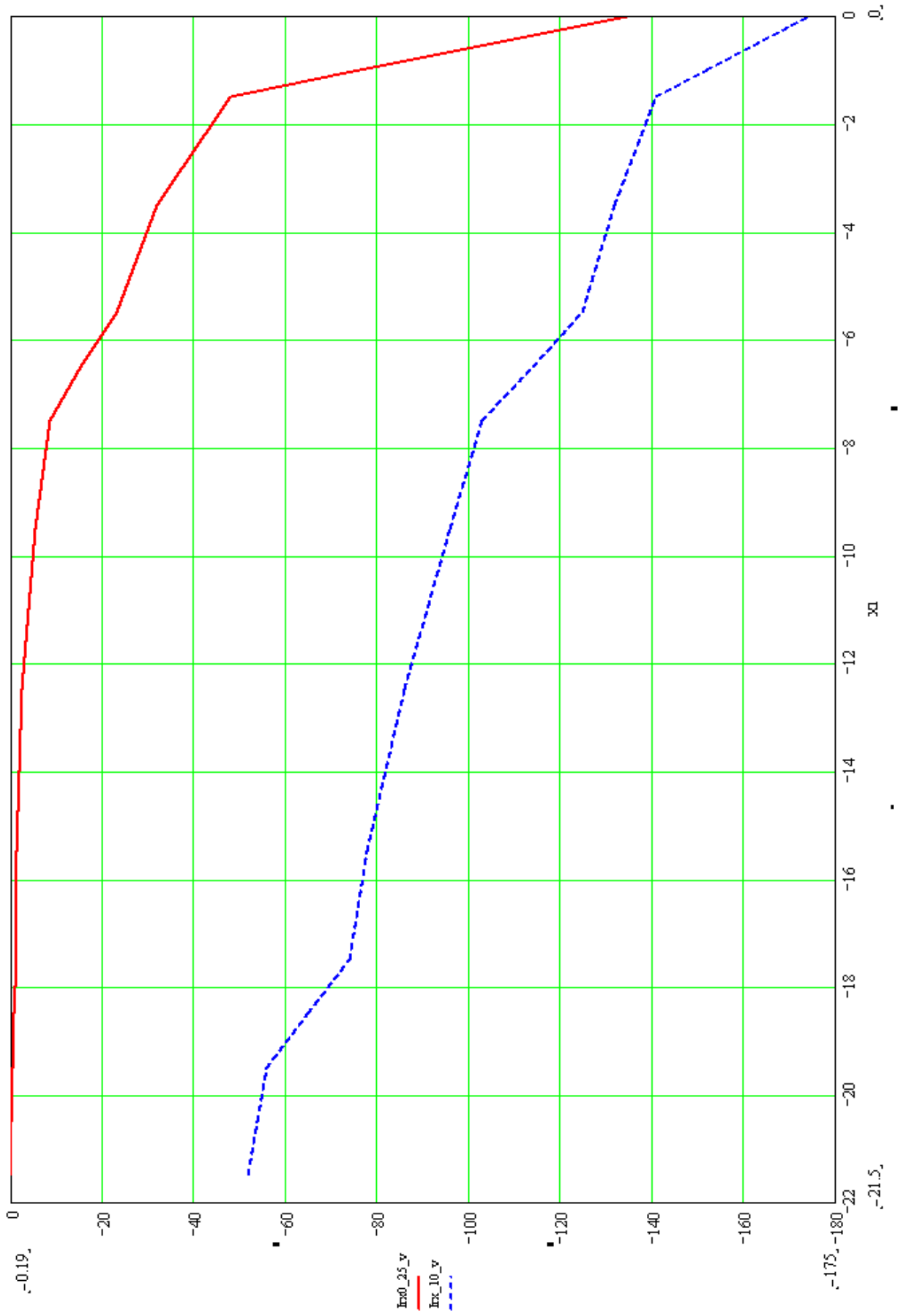


РИСУНОК 1.8

**РОЗДІЛ 2. Дослідження впливу системи тягового енергопостачання ст. П'ятихатки - Стикова на обладнання СЦБ ділянки електротяги змінного струму, що примикає до станції, й заходи щодо зниження заважаючого впливу.**

**2.1. Аналіз впливу режимів роботи системи тягового електропостачання ст. П'ятихатки - Стикова на обладнання СЦБ**

Основною причиною відмов рейкових кіл систем СЦБ, у зоні примикання електротяги змінного струму, як встановлено розрахунками й досвідами, є насичення магнітопроводів колійних дросель- трансформаторів ДТ.1.150 постійним зворотним тяговим струмом витоку зі станції П'ятихатки - Стикова. Струм в основній обмотці ДТ.1.150, що насичує магнітопровід, виникає, у свою чергу, внаслідок асиметрії рейкової лінії по постійному струму нормативні величини, що значно перевищує.

Зупинимося на стані асиметрії опорів рейкових ліній в експлуатаційних умовах.

Вимір коефіцієнта асиметрії в діючих установках систем показують, що його величина, як і слід очікувати, більше взимку, чим влітку. Обробка статистичних даних вимірів опору струмопровідних стиків, внесеного значний внесок в асиметрію рейкової лінії, показала, що опір стиків розподілений за несиметричним законом, розкид опорів від 1,8 до 15 м.ц.р. (метрів цілої рейки). Встановлено також, що коефіцієнт поздовжньої асиметрії коливається від 10%...12% - влітку, 18%...28% - взимку [2,4].

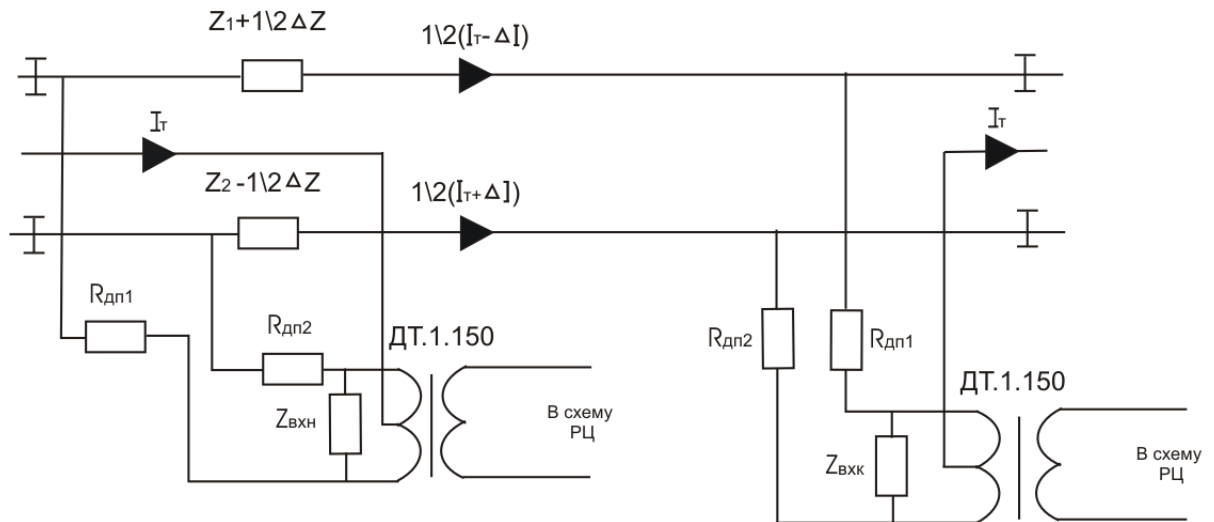


Рисунок 2.1 – Схема заміщення рейкової лінії

З рівняння для ЕДС по контуру схеми заміщення рейкової лінії (рис. 2.1), складеної із двох рейок і наведених опорів апаратури,  $Z'_{вхн}$ ,  $Z'_{вхк}$ , можна записати для різниці струмів (вважаючи ідеальним ДТ) вираз:

$$I_T \cdot \Delta Z' - \frac{1}{2} \Delta I (Z + Z'_{ВХН} + 2Z'_{ДП1} + Z'_{ВХК} + 2R_{ДП2} + Z_{ДР}) = 0,$$

Звідки знаходимо

$$\Delta I = \frac{\Delta Z'}{Z + Z'_{ВХН} + Z'_{ВХК} + 2(R_{ДП1} + R_{ДП2}) + Z_{ДР}} I_{ЕЛ}, \quad (2.1)$$

$$\text{де } \Delta Z' = \Delta Z + 2(R_{ДП1} - R_{ДП2}).$$

Вираз (3.2.1) показує, що  $Z'_{вхн}$ ,  $Z'_{вхк}$  виявляють симетричну дію, але їх опір для сигнального струму, за умовами контролю цілісності рейки, невеликий, приблизно 0,2...0,25 Ом, а для основної гармоніки тягового струму вони ще менші, особливо, якщо взяти до уваги, що при насиченні опір дроселя  $Z_{др} \rightarrow \min$ . Тоді цим опором можна знехтувати і вважать, що

$$\Delta I = \frac{\Delta Z + 2(R_{ДП1} - R_{ДП2})}{Z + 2(R_{ДП1} + R_{ДП2})} I_{ЕЛ} \quad (2.2)$$

В виразах (2.1) і (2.2) прийняті позначення:

$\Delta Z$  - різниця опорів рейок, Ом;

$Z$  - опір рейкової петлі, Ом/км;

$Z_{12}$  - опір взаємодукції рейок, Ом;

$Z_{op}$  - опір основної обмотки дросель-трансформатора, Ом;

$R_{\partial n1(2)}$  - опір дросельних перемичок, Ом;

Для постійного струму рівняння (2.2) можна записати так:

$$\Delta I = \frac{\Delta R_{cc} + 2(R_{дп1} - R_{дп2})}{R_p + 2(R_{дп1} + R_{дп2}) + R_{др}} I_{ЕЛ}, \quad \text{або} \quad \Delta I = K_a \cdot I_{ЕЛ}, \quad (2.3)$$

Звідки коефіцієнт поздовжньої асиметрії рельсової лінії дорівнює:

$$K_a = \frac{\Delta R_{cc} + 2(R_{\partial n1} - R_{\partial n2})}{R_p + 2(R_{\partial n1} + R_{\partial n2}) + \Delta R_{cc}}, \quad (2.4)$$

де  $\Delta R_{cc}$  - різниця опорів рейок за рахунок опорів з'єднувачів.

У рівнянні (2.4) варто було б додати опір стрілочного електротягового з'єднувача, який встановлюють на стрілками. Його відсутність в (2.4) створює певний запас по впливу величини  $K_a$ .

Відзначимо, що при сталевих рейкових з'єднувачах і дросельних перемичках треба не тільки забезпечити відповідність їх перетину умовам пропуску зворотного тягового струму, але й, що особливо важливо, виконати вимоги мінімізації їх впливу на поздовжній опір рейкових ниток. У коротких станційних (перегінних) рейкових колах асиметрія поздовжнього опору рейкових ниток є однією з головних причин асиметрії тягового струму. Особливо ця проблема актуальна в горловинах станції, де спостерігаються відмови РК, про що відзначалося вище.

З результатів вимірів випливає, що опір сталевих рейкових з'єднувачів постійному струму розподілене між його складовими в такий спосіб [1, 4, 5]

$$R_{cc} = R_M + R_{TP} + R_{CB} = \frac{2}{5} R_{cc} + \frac{3}{5} R_{cc} = R_{TP} + (R_M + R_{CB})$$

де  $R_M$  - опір переходів манжети - трос;

$R_{TP}$  - опір сталю тросу;

$R_{CB}$  - опір звареного шва.

Для використовуваного в практиці з'єднувача зі сталі перетином  $2*50$  мм<sup>2</sup> виявилось, що середні величини  $R_{TP} = 274$  мкОм;  $R_M + R_{CB} = 282$  мкОм;  $R_{cc} = 556$  мкОм; для з'єднувача перетином  $1*100$  мм<sup>2</sup> -  $R_{cc} = 307+423 = 730$  мкОм.

Розрахунки показали, що для постійного струму при мідних з'єднувачах коефіцієнт асиметрії (Правила по захисту металевих споруджень від корозії блукаючими струмами допускають збільшення опору рейок за рахунок стиків не більш, ніж на 20%)  $K_r = \frac{\Delta r}{r} = 0.12$ . Проведемо розрахунок

асиметрії для тягового змінного струму при допущеннях:

- Опір рейок різниться між собою на величину опору з'єднувачів;
- Втрати в з'єднувачах не залежать від частоти;
- Опір у місцях приварки й переходів трос - манжета залежать від частоти в такій же мірі, як і внутрішній опір рейок.

Тоді коефіцієнт поздовжньої асиметрії з урахуванням наведених складових

$$K_r = \frac{R_{cc}}{r} \left| \frac{2}{5} \cdot \frac{r}{Z} + \frac{3}{5} \cdot \frac{Z_i}{Z} \right| = 9,5\% , \quad (2.5)$$

де  $Z_i$  - внутрішній опір рейок,  $0,35e^{j38}$  Ом/км,

$r = 0.1$  Ом;  $Z = 0.8e^{j65}$  Ом/км – опір рейок струму 50 Гц (зі стиковими з'єднувачами).

Для з'єднувача перетином  $2*50$  мм<sup>2</sup> коефіцієнт по змінному струму частотою 50 Гц перевищує нормативну величину (0,05).

З формули (2.4) слідує, що коефіцієнт асиметрії істотно залежить від різниці опорів дросельних перемичок по постійному струму. Відповідно до технічних вимог, перехідний опір (штепсель – провід – шина) перемички не повинен перевищувати  $60000*10^{-6}$  Ом. Тоді різниця опорів рейкової лінії  $\Delta R$  з урахуванням опорів сталевих з'єднувачів однієї рейкової нитки довжиною 0,5 км

$$\Delta R = R_{cc} n_{CT} + \Delta R_{ДП} = 2 * 556 * 10^{-6} * 29 + 9848 * 10^{-6} = 30900 * 10^{-6} \text{ Ом};$$

Прийmemo  $\Delta R = 0,030$  Ом. Надалі цю величину використовуємо для пошуку струмів підмагнічування дросель-трансформаторів.

Помітимо тут, що різниця опорів рейкових ниток може бути визначена, виходячи з міркувань. Відомо [2, 5, 11, 12], що опір сталевих перемичок становить  $8000 * 10^{-6}$  Ом довжиною (3,25м) і  $3076 * 10^{-6}$  Ом короткої (1,25 м). Тоді подвоєна різниця досягне  $9846 * 10^{-6}$ , а з урахуванням з'єднувачів маємо  $\Delta R = 0,029$ , що близько до знайденого вище значенню.

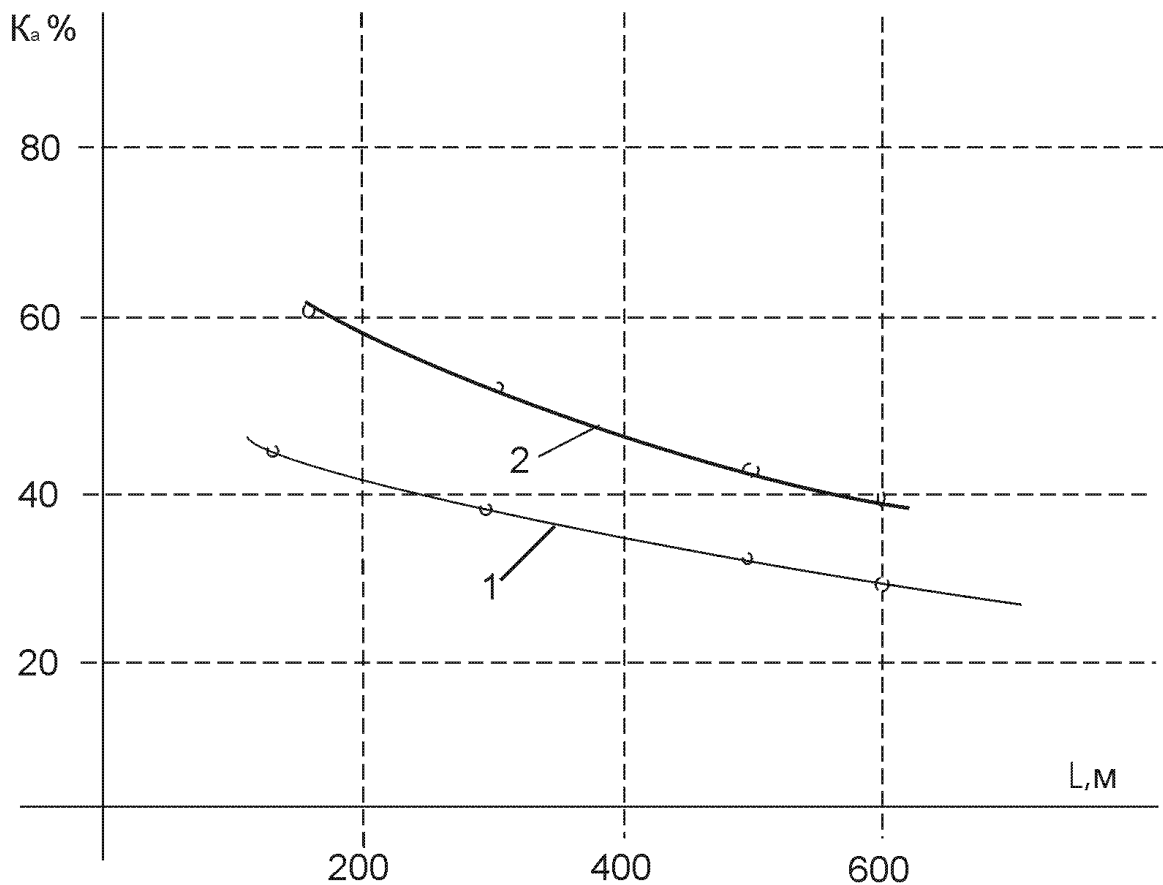


Рисунок 2.2 – Залежність асиметрії по постійному струму від довжини РК (1 – при  $\Delta R_{cc} = 0,029$  Ом; 2 – при  $\Delta R_{cc} = 0,05$  Ом)

На малюнку 2.2 наведені розрахункові графіки залежності асиметрії РЛ від довжини лінії по формулі (2.4) прийнятої при різницевій величині (1)  $\Delta R = 0,029 \dots 0,035$  Ом.

Зрівняємо коефіцієнт  $K_a$  для рейкового кола довжиною 0,5 км по постійному й змінному струмах. У першому випадку

$$K_a = \frac{0,029}{0,1 * 0,5 + 0,032} = 35,4\% , \text{ у другому } K_a = \left| \frac{0,029 * 100\%}{0,8e^{j65} * 0,5 + 0,032} \right| = 6.70\% .$$

Із графіка (рис. 2.2) видно, що асиметрія рейкових ліній 31,4% по постійному струму досягається при різниці величин опору між рейковими нитками 0,029 Ом при довжині рейкової лінії 0,5 км, а при довжині 0,7 км така ж асиметрія буде мати місце при різниці величин близько 0,05 Ом.

Тепер звернемося до питання намагнічування дросель-трансформатора постійної складової тягового струму.

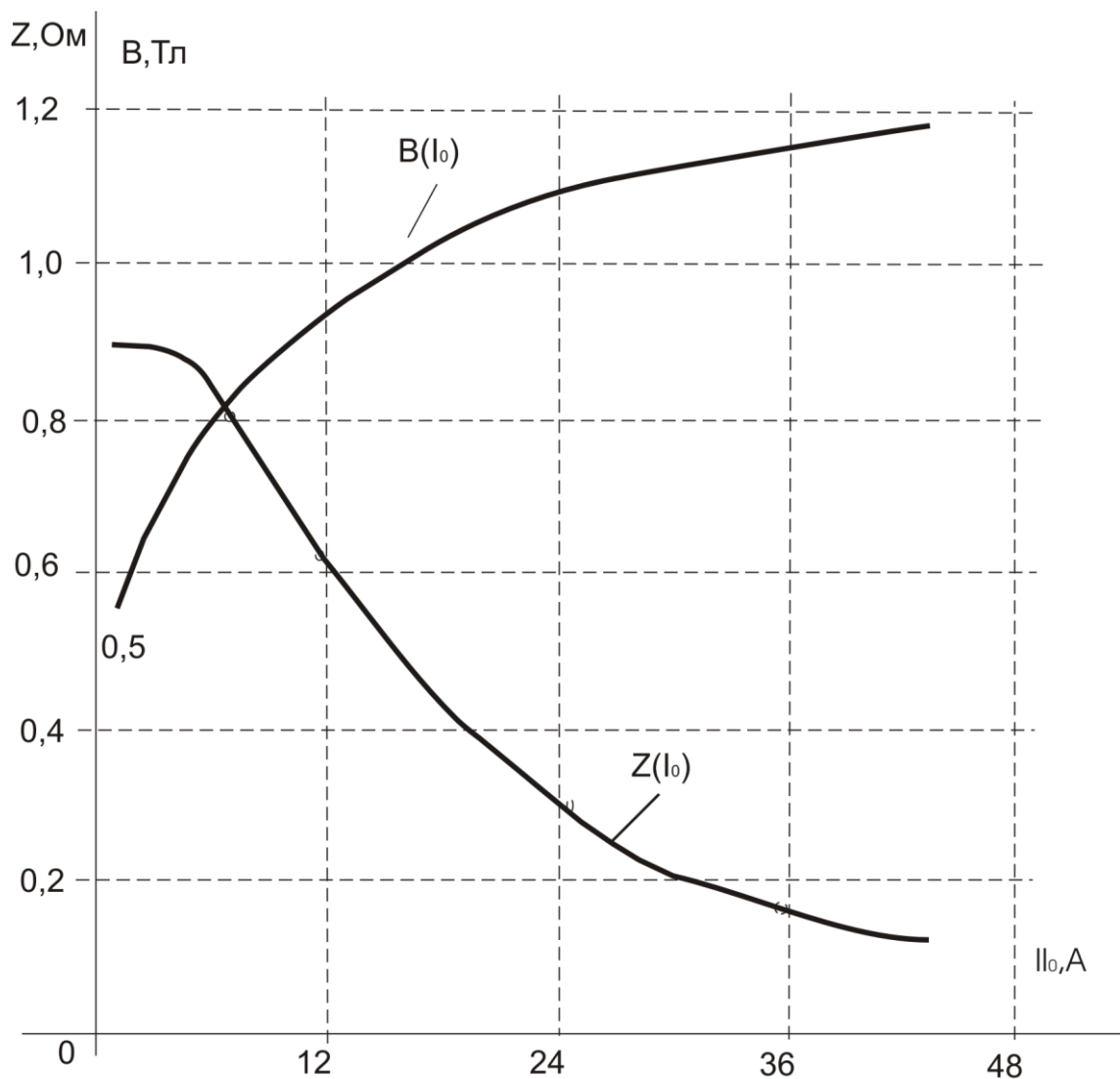


Рисунок 2.3 – Залежність галузі намагнічування  $Z(I_0)$  і індукція  $B(I_0)$  для ДТ.1.150 при  $f_c = 25$  Гц

Як уже згадувалося, насичення сталі сердечників ДТ приводить до зниження опору галузі намагнічування (Рис.3.2.3) схеми заміщення й до росту опору передачі чотирьополосника ДТ ( $Z_{II} = \frac{U_{вх}}{U_{вых}}$ ). Це погіршує нормальний режим роботи рейкового кола (інші режими тут не розглядаються). Для кількісної оцінки впливу струмів підмагнічування на напругу шляхового елемента приймача в лабораторних умовах проведено макетування рейкового кола із застосуванням підмагнічування дросель-трансформаторів (Рис.3.2.4). Схема макета містить на релейному кінці типову апаратуру відповідно до нормалі РК 25-ЭТ 3-88, другий дросель-трансформатор і ланцюг підмагнічування дроселів по додаткових обмотках від випрямного пристрою ВУ; у ланцюзі постійного струму включений L-3 контур, настроєний на частоту сигнального струму 25 Гц. Як індуктивність прийнятий ДТ-0,6-500, його додаткова обмотка. Другий дросель-трансформатор навантажений на резистор  $R_n$ , дорівнює наведеному опору навантаження першого ДТ. Обмотки дроселів, використані в ланцюзі підмагнічування, включені зустрічно.

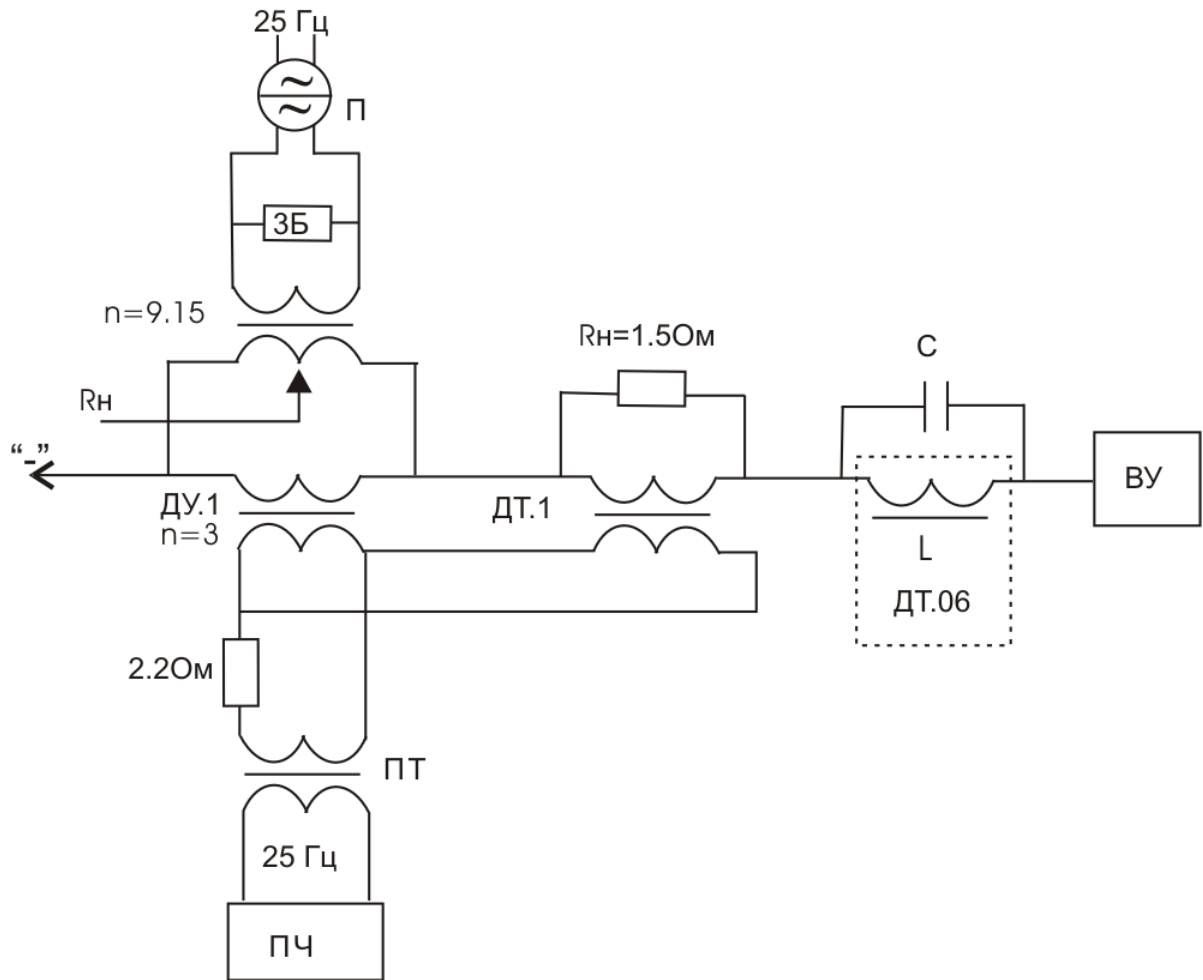


Рисунок 2.4 – Схема випробування ДТ.1.150 на намагнічування постійним струмом

З малюнка 2.4 отримані розрахункові опори холостого ходу дросель-трансформатора ДТ.1.150 від струму підмагнічування.

Розрахунок залежності напруги на колійному елементі реле ДСШ-13А  $V_{ПЭ}(I_0)$  наведений за класичною методикою [3, 9 – 13] з урахуванням допущень:

- Дросель-Трансформатори представлені у вигляді ідеальних трансформаторів з коефіцієнтами трансформації  $n = 3$ ;
- Основна обмотка ДТ закорочена опором холостого ходу  $Z_{xx}(I_0)$  й паралельно підключеним до нього наведеним опором навантаження  $Z_H$ .

Струм частотою 50 Гц в основному замикається через наведений опір навантаження схеми РК, а постійний струм через вітку намагнічування ДТ.1.150.

Як відзначено в главі 1 по цій проблемі, постійний тяговий струм витоку у двох шляхах перегону, на границі зі станцією П'ятихатки – Стикова, становить 280 ... 320А, а на віддаленні 20 км від цієї станції – 80 ... 120А. Тоді струм асиметрії в основних обмотках ДТ.1.150 по одному шляху може досягати: на границі станції стикування  $\Delta I = 0.3 \cdot \frac{320}{2} = 48.9 \text{ А}$ , а на відстані 20 км -  $\Delta I = 0.3 \cdot \frac{120}{2} = 18.9 \text{ А}$ . По всій основній обмотці еквівалентний струм підмагнічування вдвічі менше, тобто 24,0А и 9,0А.

Разом з тим, граничний струм підмагнічування, що викликає відмова рейкового кола, досягає 7...9А (див. рис. 2.3), що встановлено вимірами на макеті РЦ.

При оцінці впливу струму підмагнічування на колійний приймач варто було б відшукати коефіцієнти чотиріполюсника ДТ.1.150 при різних величинах опору ланцюга намагнічування, тобто  $Z(I_0)$  (рис. 2.3), що ускладнило б завдання. По-перше, тому, що відомі методи розрахунку коефіцієнтів [3, 5, 6], наприклад метод холостого ходу й короткого замикання, вирішують завдання в лінійній системі; по-друге, пошук коефіцієнтів у нелінійної, як у нашій випадку, системі, хоча й ускладнений, але принципово може бути успішним.

Залежність напруги на колійному приймачі  $U_{пз}(I_0)$  при підмагнічуванні ДТ.1.150 побудована за результатами досвідчених вимірів на макеті РК (рис. 2.4) Разом з тим, ця залежність була розрахована аналітично за спрощеною схемою заміщення (рис. 2.5) з параметрами:  $Z'$  -наведений опір релейного навантаження  $Z_H$ , рівне

$$\frac{Z_H}{\Pi_{IT}^2 \cdot \Pi_{DT}^2} = \frac{1020 \cdot e^{j50}}{(3 \cdot 18,3)^2} = 0,33 \cdot e^{j50} \text{ Ом};$$

$R_{\Pi}$ ,  $R'_{\Pi}$  - опір обмежувача 2,2 Ом і його наведений опір у схемі питаючого кінця, рівне 0,244 Ом,  $Z(I_0)$  - опір ланцюга намагнічування ДТ.1.150 з аргументом 75...85.

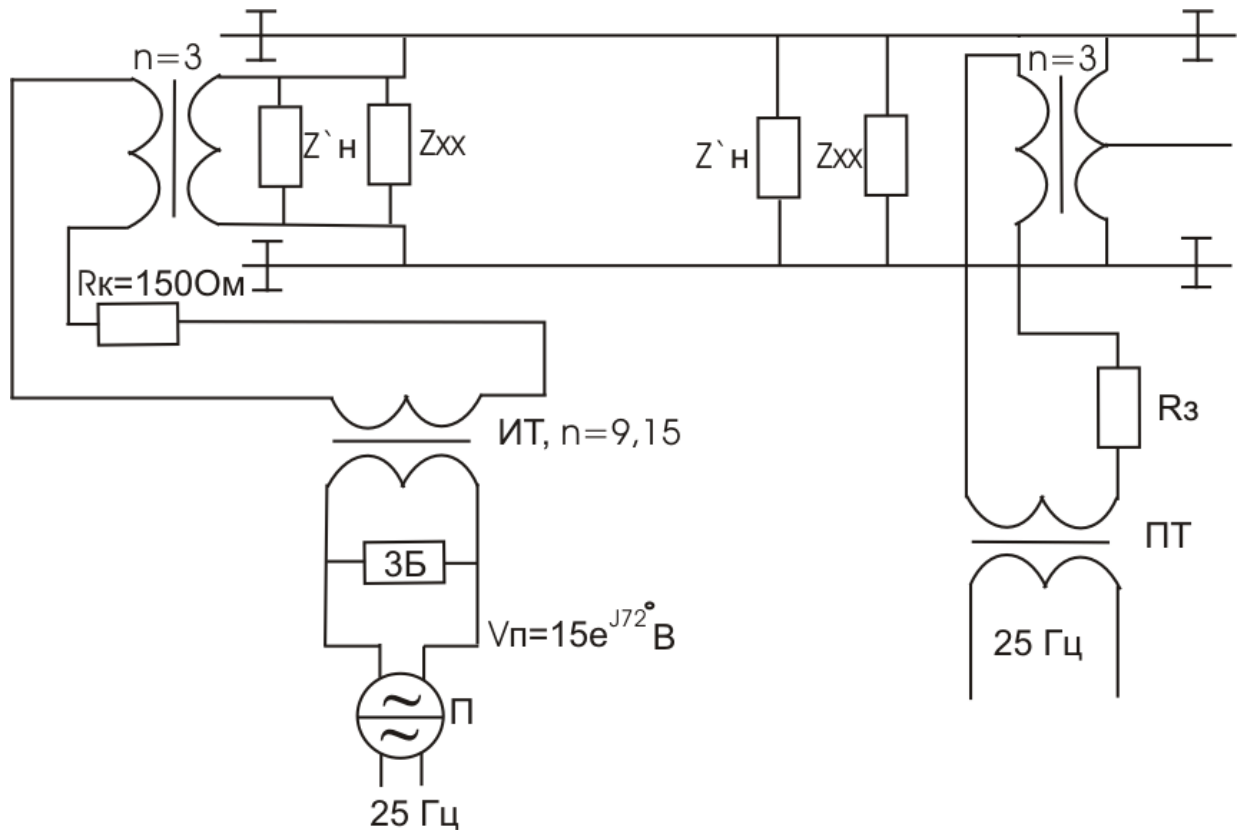


Рисунок 2.5 – Розрахункова схема заміщення для оцінки впливу струму підмагнічування на приймач РК

Вихідні дані для розрахунку нормального режиму двохниточної РК частотою 25Гц відповідають нормалі й запозичені з [5, 9, 10], зокрема, напругу й струм шляхового приймача  $15e^{j72^\circ}$ У; 0,037А, опір ізоляції  $R=50$ ,  $Z_p = 0.5e^{j52}$  Ом/км довжина РК -0.25 км. Розрахунок виконаний при двох крайніх значеннях струму підмагнічування  $I_0 = 0$ А і  $I_0 = 25$ А і опорах  $Z_{xx} = 0.9$ ; 0.25Ом.

У табл. 2.1 наведені основні електричні характеристики в найбільш важливих місцях схеми рейкового кола (див. Рисунок 2.5), отримані розрахунковим шляхом, а в табл. 2.2. данні отримані виміром реальних параметрів ДТ.

Таблиця 2.1 – Електричні характеристики схеми рейкового кола (рис. 2.5)

Режим роботи ДТ.1.150	$U_k, В$	$I_k, А$	$U_H, В$	$I_H, А$	$U_{пт}, В$	$I_{пт}, А$	$Z_{xx}$	$\beta_p,$ град	$U_{пэ}, В$
( $I_0 = 0.$ ) без намагнічування	0.32	0.96	0,42	0,96	2.10	0,40	0,9	22	15.0
( $I_0 = 25 А$ ) при підмагнічуванні	0.32	3,2	0.68	6,9	6.8	2.33	0.16	40	4.6

Таблиця 2.2 - Результати вимірів опору ДТ

$U_{25}$	$I_0/I_{00}, А$ Параметр	0	1/3	2/6	3/9	4/12	5/15	6/18
0,44	$U_{00}, В$	0.44	0.44	0.432	0.4	0.44	0.45	0.443
	$I_{25}, А$	0.375	0.875	1.4	2.1	2.5	2.5	2.5
	$Z_{дт}, Ом$	1.17	0.503	0.308	0.19	0.176	0.17	0.17
1,0	$U_{00}, В$	1	1	1.05	1	1	1	1
	$I_{25}, А$	0.65	1.7	2.8	4.6	6.3	-	-
	$Z_{дт}, Ом$	1.53	0.59	0.375	0.217	0.16	-	-

Примітка:

а) Параметр  $I_0$  – струм намагнічування: у чисельнику – у додатковій обмотці, у знаменнику – в основній.

б)  $I_{25}$  струм в основній обмотці частотою 25 Гц (див. Рисунок 2.6).

Отримане відношення напруг  $U_{птmin} / U_{птmax}$  живильного трансформатора при відсутності струму підмагнічування й при струмі  $I_0 = 25А$  служить для пошуку напруги на шляховому приймачі по формулі:

$$U'_{пэ} = \frac{U_{пм\min}}{U_{пм\max}} * U_{пэ\text{расчет}},$$

де  $U_{пэ\text{расчет}} = 15 \text{ У}$  напруга шляхового приймача, прийнята в розрахунках.

З табл. 2.1 видно, що напруга приймача при максимальному струмі підмагнічування зменшилася більш, ніж у три рази й цілком задовільно збігається з напругою на приймачі.

Звідси можна затверджувати, що вирішальний внесок у порушення нормальної роботи реле ДСШ вносить механізм насичення сталі сердечників дросель-трансформаторів.

## 2.2. Визначення опору ДТ.1.150 ( $f=25\text{Гц}$ ) при підмагнічуванні постійним струмом (експериментальний шлях)

Схема виміру параметрів ДТ представлена на малюнку 2.6, а. Живлення основних напівобмоток, включених паралельно, здійснювалося від перетворювача частоти ПЧ 50/25 через трансформатор ПРТ напругою 0,44 і 1,0 В. Дані вимірів представлені в табл. 2.2.

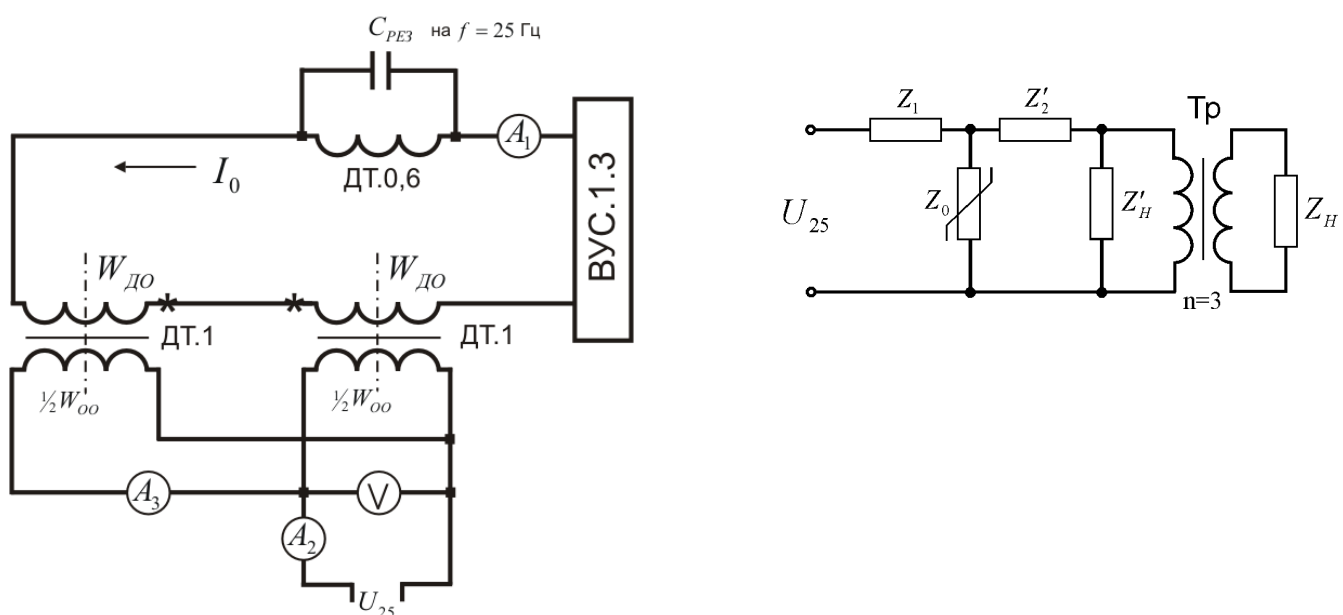


Рисунок 2.6. а) Схема виміру параметрів ДТ.1.150

## б) Схема заміщення ДТ.1.150

За результатами вимірів на малюнку 2.7 побудовані залежності опорів дросель-трансформатора при намагнічуванні постійним струмом до величини 18 А. Помітимо тут, що струм підмагнічування по основній обмотці перевищує струм додаткової обмотки в 3 рази.

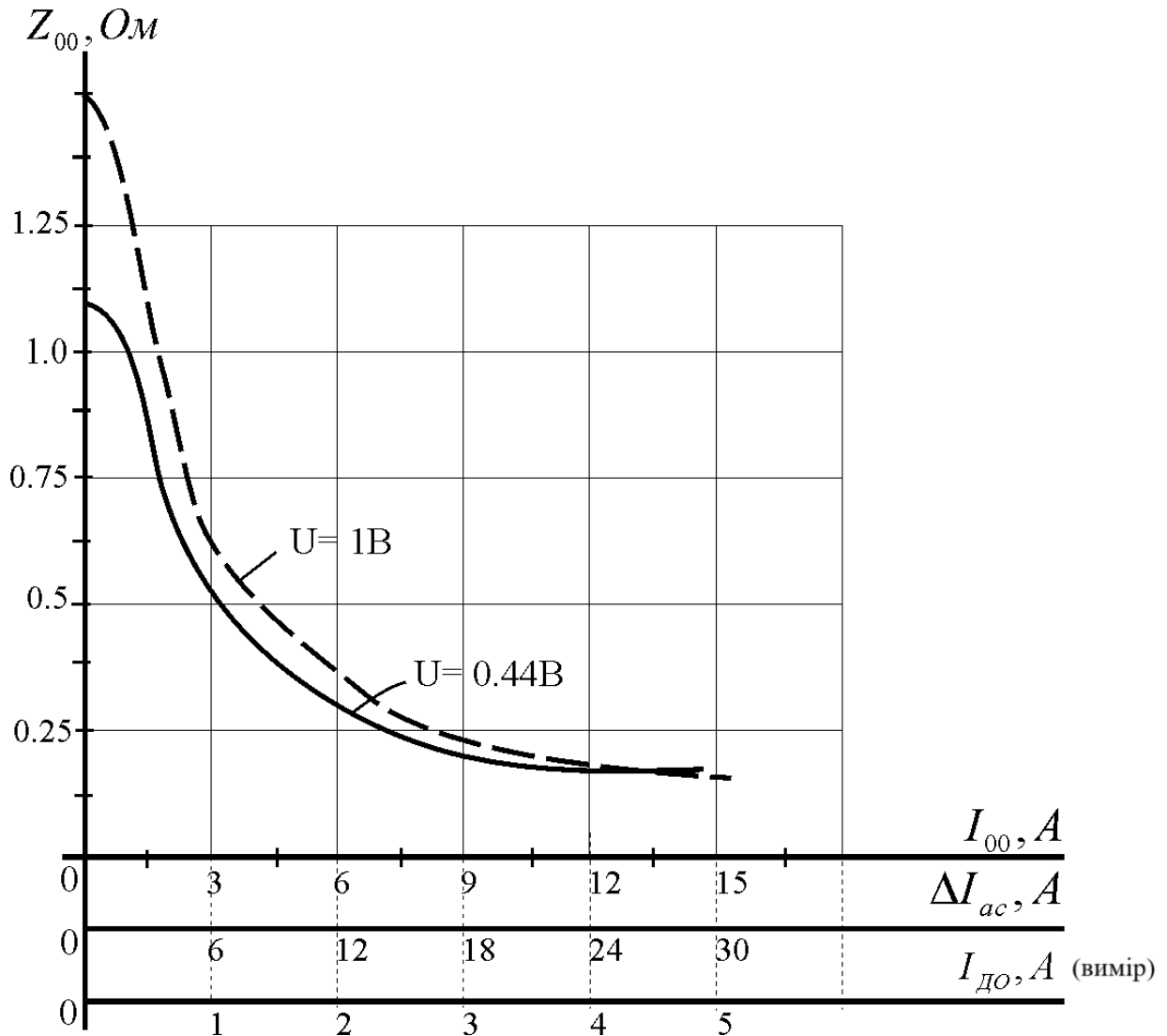


Рисунок 2.7 - Залежності  $Z_{ДТ}(I_{00})$  при  $U_{25ДТ} = var$

З рис. 2.7 видно, що опір ДТ.1.150 найбільше круто падає при струмі підмагнічування, що перевищує 1,5...2 А, причому модуль опору більше при більшій напрузі сигнального струму 25 Гц. Наприклад при напрузі 0.44В і росту струму намагнічування від нуля до 2 А, опір ДТ знижується з 1,17 Ом

до 0,8 Ом, тобто на 46%, а при напрузі 1В - з 1,53 Ом до 1 Ом, тобто на 53 %. У міру подальшого росту струму намагнічування опір ДТ.1.150 сигнальному струму 25 Гц продовжує знижуватися, наближаючись до мінімального значення 0.16...0.18 Ом.

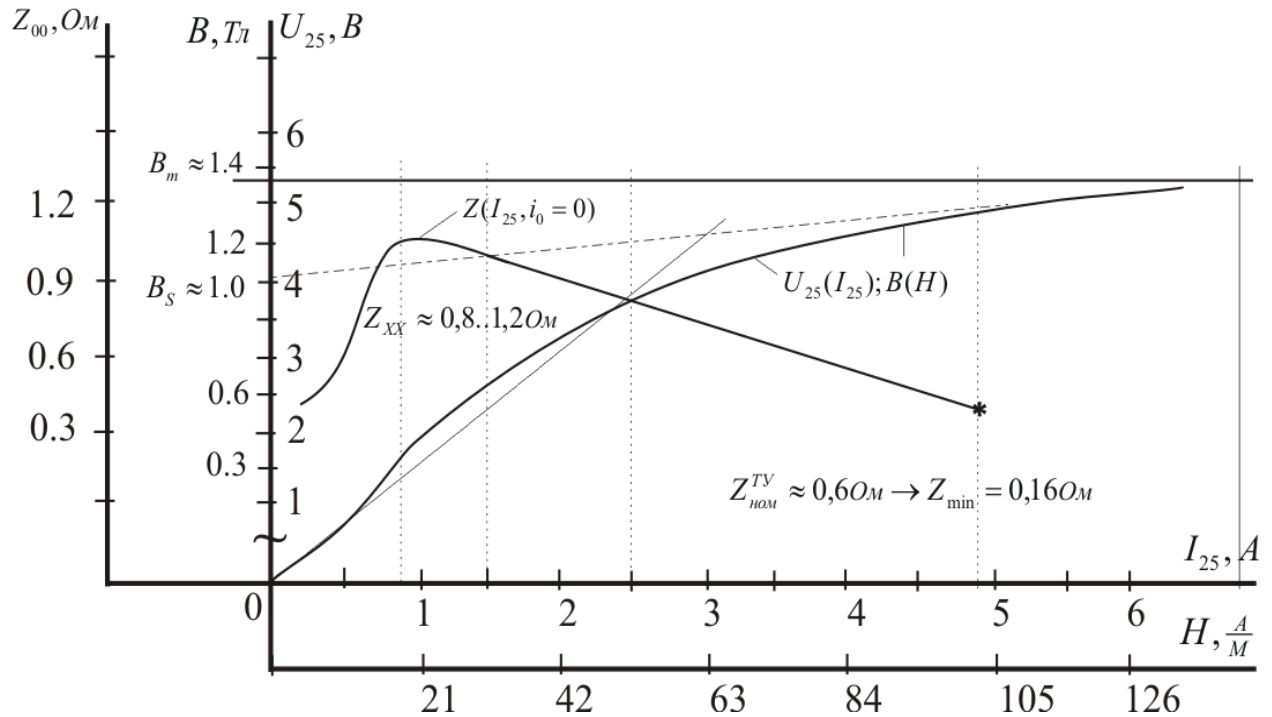


Рисунок 2.8 – Залежності  $U_{25}(I_{25})$  ДТ.1.150, В(Н)

Вольт-амперна характеристика ДТ.1.150 (рис. 2.8) являє собою, по-суті, криву намагнічування сталі сердечників В(Н). На цьому малюнку показана залежність опору дросель-трансформатора від сигнального струму 25 Гц при відсутності струму намагнічування. Індукція сердечників перебуває по формулі  $B = \frac{U}{4,44fWS}$ , де  $S = 29,25 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$  – перетин сердечників ДТ.1.150 ( $\ell = 0,58 \text{ м}$  - довжина середньої лінії). Напруженість поля  $H = IW / \ell$ , А/м.

У результаті різкого зменшення опору ланцюга, що намагнічує, ДТ.1.150 зростає опір передачі рейкового кола й знижується струм в обмотці колійного приймача реле ДСШ-13. Струм у колійному реле, як відомо, можна виразити через напругу джерела струму 25 Гц  $U_{\text{тр}}$  і дійсне значення опору передачі:

$$I_P = \frac{U_{TP}}{K_{TH}^1 K_{TK} [A \cdot Z_{BKK} + B + (C \cdot Z_{BKK} + D) Z_{BKH}^1]}, \quad (2.6)$$

де  $DO_{TH}^1 = C_H Z_H + A_H$  – зворотний коефіцієнт загасання струму чотириполюсника живильного кінця, навантаженого на опір  $Z_H = R_{II} = 2,2$  Ом;

$K_{TK}$  – коефіцієнт загасання струму релейного кінця, дорівнює відношенню струму наприкінці РЦ до струму в обмотці реле;

$A, B, C, D$  – коефіцієнти рейкового чотириполюсника;

$Z_{BKH}^1 = \frac{D_H R_{II} + B_H}{C_H R_{II} + A_H}$  – зворотний вхідний опір живильного

чотириполюсника, обумовлене коефіцієнтами  $A_H, B_H, C_H, D_H$  і опором  $R_{II}$ ,

$Z_{BKK} = \frac{A_K Z_P + B_K}{C_K Z_P + D_K}$  – вхідний опір релейного кінця, що залежить від

коефіцієнтів чотириполюсника  $A_K, B_K, C_K, D_K$  і опору реле  $Z_P$ .

Рішення рівняння (2.6) з математичної точки зору являє собою складне нелінійне завдання, оскільки коефіцієнти чотириполюсників питаючого і релейного кінців істотно залежать від магнітного стану сердечників дросель-трансформаторів. Строго говорячи, ці коефіцієнти повинні бути визначені при кожному значенні струму намагнічування й, у результаті, виражені безперервними нелінійними функціями струму намагнічування.

Помітимо тут, що для визначення коефіцієнтів ДТ при намагнічуванні сталі сердечників класичний метод короткого замикання й холостого ходу не придатний, оскільки виникають труднощі визначення комплексної величини струму короткого замикання. Для цієї мети необхідна спеціальна схема випробування, що розв'язує вимірювальний струм частотою 25 Гц і постійний струм підмагнічування. Крім того, найкраще використовувати метод відомих навантажень для визначення коефіцієнтів В и Д, а розрахунки й виміри аргументів виконувати по першій гармоніці струму 25 Гц.

З огляду на ці обставини, завдання оцінки напруги на шляховому реле при дії струмів намагнічування ДТ вирішимо наближеним методом. Для цього схему заміщення дросель-трансформаторів представимо у вигляді Т-

Образного чотириполюсника, підключеного до навантаження через ідеальний трансформатор з коефіцієнтом трансформації  $n = 3$  (рис. 2.6, б). На схемі позначено:  $Z_1, Z_2^1$  – опору обмоток і втрат від потоків розсіювання;  $Z_0$  – опір ланцюга намагнічування сталі сердечників;  $Z_H^1$  – наведений опір навантаження ДТ. Як треба з [1, 3, 5, 9], при відсутності струму намагнічування сердечників вхідний опір навантаження релейного кінця розглянутих РК (див. Нормаль ГТСС РЦ-25-ЭТ 50-388) становить  $0,30 e^{j24^0}$  Ом, а зворотний вхідний опір питаючого кінця –  $0,245 e^{j10^0}$  Ом. У цьому випадку еквівалентний опір по кінцях ланцюга складе

$$Z_{\text{екв}} = \frac{Z_H^1 \cdot Z_0}{Z_H^1 + Z_0}. \quad (2.7)$$

У формулі (2.7) опорами  $Z_1$  і  $Z_2^1$  зневажили.

Використовуючи залежності (рис. 2.7)  $Z_0(I_0)$  і задаючись значеннями струмів намагнічування, можна розрахувати напругу на шляховому елементі рейкового кола.

Сутність методу розрахунку нормального режиму зводиться до послідовного пошуку напруг і струмів частотою 25 Гц на елементах розрахункової схеми, починаючи від релейного кінця й впливаючи до питаючого кінця РК. Вихідними розрахунковими даними є:

- напруга повного підйому сектора на колійному елементі 17,5 В,
- струм повного підйому 0,0437 А,
- кут між струмом і напругою колійного елемента 72<sup>0</sup>,
- опір ізоляції прийнятий для зимових умов, у цьому випадку витокотом струму між рейками можна зневажити 50 Ом·км,
- питомий опір рейок току 25 Гц 0,5 e<sup>j52<sup>0</sup></sup> Ом/км,

- довжина рейкового кола 0,3 км,
- напруга й струм частотою 25 Гц у додатковій обмотці прийняті згідно [5]  $1,11e^{j74^{\circ}}$  В и  $0,35e^{j64^{\circ}}$  А,
- опір  $Z_0$  приймалося по заданому струму намагнічування із залежностей рис. 2.8; його аргумент із ростом  $I_0$  варіювався в межах  $66^{\circ}$ - $85^{\circ}$

Спочатку визначалися базисні значення напруги й струму питаючого трансформатора при відсутності струму намагнічування, потім розрахунки велися до значень струму намагнічування, при яких реле гарантовано розмикає фронтів контакти. Ступінь зниження напруги на шляховому елементі реле визначалася за коефіцієнтом  $K \approx \sqrt{\frac{S_{пт}^1(i_0)}{S_{пт}^1}}$ , де  $S_{пт}^1(i_0)$  - потужність джерела струму при розрахунковому струмі намагнічування;  $S_{пт}^1$  - теж при відсутності намагнічування. Значення потужностей отримані з виправленням на кут расстройки реле.

У табл. 2.3 представлені основні розрахункові параметри РЦ.

Таблица 2.3

$I_{00}$	$\Delta I_{ac}$	$Z_0$	$V_{пт}^1$	$S_{пт}^1$	$\beta_p$	$U_{пэ}$	Примітка
А	А	Ом	В	ВА	град	В	
0	0	$1,17^{66^{\circ}}$	2,8	1,17	8	17,5	Контакти замкнуті
3,0	6	$0,52^{75^{\circ}}$	5,4	4,9	26	9,07	
6,0	12	$0,28^{80^{\circ}}$	6,85	6,96	32	7,15	Контакти розімкнуті
9,0	18	$0,18^{86^{\circ}}$	8,3	8,8	36	5,9	

Примітка: При напрузі на реле меншому 17,5 В треба дані графі  $U_{\text{пз}}$  зменшити в  $17,5/U_{\text{пдейств}}$  раз.

Видно, що з ростом струму намагнічування більше 8 А колійне реле розмикає фронтові контакти, причому кут розладу зростає до 30 і більше градусів. Струм асиметрії (постійний) РК при цьому досягає 12...18 А. Відзначимо тут, що розрахункові дані табл. 2.3 добре збігаються з даними макетування РК із підмагнічуванням струмом.

Таким чином, основною причиною помилкової зайнятості рейкових кіл на ст. Зелена Одеської залізн. варто вважати намагнічування ДТ.1.150 за рахунок поширення тягового постійного струму в зону електротяги змінного струму й наявності в коротких РК асиметрії критичного рівня, яку варто оцінювати по постійному тяговому струму.

### **РОЗДІЛ 3. Про метод розрахунку рейкових кіл з нелінійними феромагнетиками в умовах впливу перешкод тягового струму.**

#### **3.1. Методика розрахунку РК із нелінійними феромагнетиками**

У роботі розглянуті причини заважаючого впливу тягового струму на роботу рейкових кіл (РК), завдяки чому запропонована методика розрахунку РК із нелінійними феромагнетиками (ФМ) і технічні рішення по підвищенню надійності РК і систем СЦБ.

Досвід експлуатації показав, що за певних умов і режимах роботи тягової мережі створюються впливи потужних перешкод тягового струму на роботу електричних рейкових кіл. Наслідку такого впливу зводяться до намагнічування нелінійних феромагнетиків (трансформатори, ДТ, елементи електричних фільтрів) у схемах РК й, як наслідок, до відмов РК і систем СЦБ.

Несприятливі умови для роботи РК відбуваються в наступних випадках:

- При певній схемі комутації тягової мережі постійного струму станцій стикування, у рейковій мережі підвищуються потенціали постійного тягового струму «рейка-земля». У результаті зростають струми витoku в перегінні шляхи, оснащені електротягою змінного струму, що викликають намагнічування дроселів-трансформаторів і шляхових трансформаторів, і порушення роботи коротких (менш 500м) рейкових кіл;
- На ділянках електричних доріг змінного струму при ожеледицях на контактній мережі на струмоприймачі створюється переривчаста електрична дуга, супроводжувана електричним перехідним процесом у силовому ланцюзі електровоза. Постійна складова цього струму при асиметрії рейкової лінії також викликає насичення феромагнетиків;
- При включенні головного вмикача ГВ електровоза в певній фазі напруги живильної мережі в ланцюзі також виникає перехідний процес із наслідками, згаданими вище;

- При в'їзді навантаженого електровоза в зону нейтральної вставки на струмознімачі виникає трохи аперіодично повторюваних електричних дуг, що приводять, як відзначалося вище, до виникнення перехідних процесів і відмовам РК.

З викладеного слід, що підвищення завадостійкості рейкових кіл систем СЦБ в умовах впливу зворотного тягового струму є актуальною науково-технічною проблемою.

Зупинимося на одній із причин порушення нормальної роботи РК - поздовжньої асиметрії рейкових ліній.

Виміру показують, що величина коефіцієнта асиметрії, як і варто очікувати, більше взимку, чим улітку. Установлено, що розподіл опору струмопровідних стиків найкраще може бути апроксимоване несиметричним законом Вейбулла, розкид опорів досягає 1,8...15 м.ц.р.(метрів цілої рейки); коефіцієнт поздовжньої асиметрії коливається від 10%...12% - улітку ,до 18% - взимку [2, 3, 4, 5].

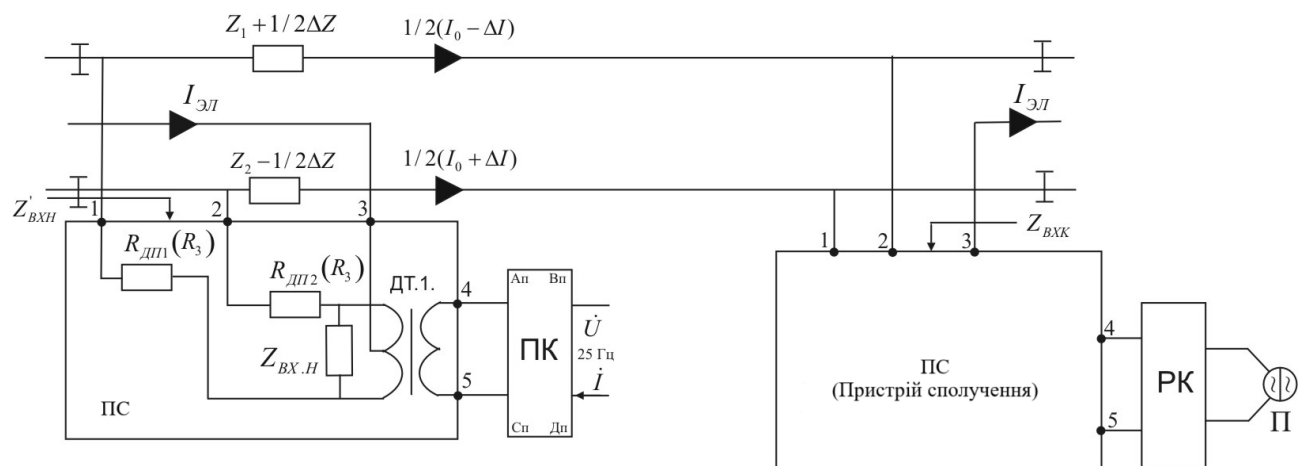


Рисунок 3.1 – Схема заміщення рейкової лінії

З рівняння для ЕДС по контурі схеми заміщення рейкового кола (рис. 3.1), складеної із двох рейок, опорів апаратів  $Z'_{вхн}$ ,  $Z_{вхк}$  і дросельних перемичок, для різниці струмів можна записати вираження:

$$\Delta I = \frac{\Delta Z' + 2(R_{ДП1} - R_{ДП2})}{Z + Z'_{вхн} + Z_{вхк} + 2(R_{ДП1} + R_{ДП2}) + Z_{др}} I_{эл}, \quad (3.1)$$

$$\text{де } \Delta Z' = \Delta Z + 2(R_{\text{ДП1}} - R_{\text{ДП2}}),$$

$\Delta Z = Z_1 - Z_2$  - різниця опорів рейок, Ом;

$Z$  - опір рейкової петлі, Ом/км;

$Z_{\text{ДР}}$  - опір основної обмотки ДТ.1, Ом;

$R_{\text{ДП(2)}}$  - опір дросельних перемичок, Ом.

З (3.1) треба, що  $Z'_{\text{вх}}$ ,  $Z_{\text{вх}}$  роблять симетрируючу дію, однак їхнього опору для сигнального (тягового) струму, за умовами контролю цілісності рейки, невеликі й ними можна зневажити.

Для постійного струму рівняння (3.1) можна записати так:

$$\Delta I = \frac{\Delta R_{\text{CC}} + 2(R_{\text{ДП1}} - R_{\text{ДП2}})}{R_{\text{P}} + 2(R_{\text{ДП1}} + R_{\text{ДП2}}) + R_{\text{ДР}}} I_{\text{ЭЛ}}, \quad \text{або } \Delta I = K_a \cdot I_{\text{ЭЛ}}, \quad (3.2)$$

Звідки коефіцієнт поздовжньої асиметрії рейкової лінії дорівнює:

$$K_a = \frac{\Delta R_{\text{CC}} + 2(R_{\text{ДП1}} - R_{\text{ДП2}})}{R_{\text{P}} + 2(R_{\text{ДП1}} + R_{\text{ДП2}}) + \Delta R_{\text{ДР}}}, \quad (3.3)$$

де  $\Delta R_{\text{CC}}$  – різниця опорів рейок за рахунок опорів з'єднувачів.

У коротких РК (менш 500м) поздовжня асиметрія – головна причина асиметрії тягового струму  $K_a = \frac{J_1 - J_2}{J_1 + J_2}$ , де  $J_{1,2}$  – тягові струми в рейках 1 й 2 (додаткова інформація по асиметрії в розділі 3.2).

Виміру показують, що опір сталевого рейкового з'єднувача постійному струму розподілено між його складовими, так [4, 5]:

$$R_{\text{CC}} = R_{\text{ТР}} + (R_{\text{M}} + R_{\text{СВ}}) = \frac{2}{5} R_{\text{CC}} + \frac{3}{5} R_{\text{CC}},$$

де  $R_{\text{M}}$  - опір переходів манжети – трос;

$R_{\text{ТР}}$  - опір сталевого траса;

$R_{\text{СВ}}$  - опір звареного шва.

Для широко використовуваного в практиці з'єднувача зі сталі перетином 100 мм<sup>2</sup>, виявилось, що середні величини  $R_{\text{ТР}} = 295$  мкОм;  $R_{\text{M}} + R_{\text{СВ}}$

= 437 мкОм;  $R_{CC} = 232$  мкОм; для з'єднувача перетином  $90 \text{ мм}^2$  -  $R_{CC} = 770$  мкОм [4, 5].

Правила по захисту металевих споруджень від корозії блукаючими струмами допускають збільшення опору рейок за рахунок стиків не більш, ніж на 20%, тоді коефіцієнт асиметрії по постійному струмі  $K_a = \frac{\Delta R}{R_p} = 0,12$ .

Наближений розрахунок асиметрії для тягового змінного струму проведемо при допущеннях [4, 5]:

- Опір рейок розрізняються між собою на величину опору з'єднувачів;
- Втрати в з'єднувачах не залежать від частоти;
- Опору в місцях приварки й переходів трос - манжета - штепсель - рейку залежать від частоти в такій же мері, як і внутрішній опір рейок.

При цьому мінімальний коефіцієнт поздовжньої асиметрії:

$$|K_z| = K_a \left| \frac{R_{TP}}{R_C \cdot Z} + \frac{(R_M + R_{CB})Z_i}{R_C \cdot Z} \right| \leq 0,08\%, \text{ або } 8,0\%, \quad (3.4)$$

де  $Z_i$  - внутрішній опір рейок,  $0,35e^{j35}$  Ом/км; опір рейкової петлі  $R_p = 0.1$  Ом;  $Z = 0.8e^{j65}$  Ом/км – опір рейок току 50 Гц. Для більше високих частот коефіцієнт  $|K_z|$  знижується до 1,608% для частоти 420 Гц і до 1,376% - 780 Гц.

Проведемо оцінку чисельника дроби (3.3) для найбільше що часто відмовляють РК довжиною 0,25...0...0,5км. Прийmemo, що  $R_{CC} = 770 \cdot 10^{-6}$  Ом,  $R_{ДП1} = 8000 \cdot 10^{-6}$  Ом ( $\ell_{ДП1} = 3,25$  м),  $R_{ДП2} = 3076 \cdot 10^{-6}$  Ом ( $\ell_{ДП2} = 1,25$  м), рейкова ланка 25м, опір рейок 0,1Ом/км,  $n_{CT} = \frac{\ell_{PC}}{0,025} - 2$ . Виявилось, що  $\Delta R = 0,026...0,056\Omega$ , а величина  $K_a$  перебуває в межах 30,2%...38,6%. Помітимо тут, що опір нитки довжиною 300 м струму 50 Гц не перевищує 0,1 Ом/км і порівнянно із сумарним опором контактних сполук «трос - штепсель - шина ДТ» (норма 60...80).

Зупинимося на запропонованій методиці розрахунку РК при нелінійних режимах ФМ схем, побудованої з використанням математичної моделі перемагнічування феромагнетиків [2, 3].

Прийmemo, що при насиченні феромагнетиків індукція (напруженість) магнітного поля сердечника ДТ.1.150 змінюється за складним законом

$$b = b_0 + \sum_{k=1}^m b_{ks} \sin k\omega t + \sum_{k=1}^m b_{kc} \cos k\omega t, \quad (3.5)$$

де  $k = 1, 2, \dots, m$ , і вимір коефіцієнтів чотиріполосників відомими методами ХХ і КЗ утруднене [3, 5, 9, 10].

Відомо, що при циклічній зміні зовнішнього магнітного поля індукція, що виникає у феромагнетику, відстає по фазі від напруженості й дає цикл динамічної петлі гістерезису (ПГ). Цикл ПГ характеризує втрати потужності від перемагнічування, вихрових струмів і від магнітної в'язкості [3].

Математична модель, що досить точно описує досвідчену ПГ, має вигляд:

$$h = Ae^{-\gamma^2 b m^2} \alpha_1 \operatorname{sh} \beta_1 b + \alpha_2 \frac{db}{dt} \operatorname{ch} \beta_2 b, \quad b = b_0 + b_m \sin \omega t, \quad (3.6)$$

і дозволяє врахувати вплив спектра гармонік вхідного струму перемагнічування феромагнетику. Параметри  $A$ ,  $\gamma$ ,  $\alpha_1$ ,  $\beta_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\beta_2$  (6), відшуковуються чисельними методами по експериментальній граничній ПГ і кривій намагнічування, знятої при максимальних величинах індукції й частоти сигналу. Перший доданок (3.6) характеризує основну криву намагнічування (ОКН), а друге - описує дисипативні процеси й втрати за цикл гістерезису.

Коефіцієнти  $\alpha_1$  й  $\beta_1$  безгістерезисної складової (3.6) визначаються методом обраних крапок по кривій ОКН; параметри  $A$  й  $\gamma$  визначаються з виражень [4]

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

причому крапку  $b_0$ ,  $h_0$  беруть поблизу максимального значення індукції  $b_m$ , а індукція  $b_m \max$  відповідає максимальному робочому значенню. Коефіцієнти  $\alpha_2$  й  $\beta_2$  перебувають із формул:

$$\alpha_2 = \frac{h_c}{\Omega \cdot b_m}, \quad \beta_2 = \frac{1}{b_m},$$

де  $h_c$  - коерцитивна сила, А/м.

Розглянемо процес перемагнічування феромагнетику при впливі на його сердечник індукції  $b = b_0 + b_m \sin \Omega t$ , створюваної полем постійного струму асиметрії й сигнального струму 25 Гц (рис. 3.2), підставимо це вираження як аргумент у формулу (6) і перетворимо її, опустивши не експонентний множник, що  $Ae^{-\gamma^2 b m^2}$  впливає на кількісний результат, першого доданка. Оскільки аргумент  $b$  змінюється за періодичним законом, то функції  $sh \beta_1 b$  й  $ch \beta_2 b$  також періодичні й можуть бути представлені рядами Фур'є [6], у яких коефіцієнтами при тригонометричних функціях будуть функції Бесселя різних порядків від чисто мнимого аргументу  $jx_m$ . У результаті одержуємо:

$$h = \alpha_1 sh \beta_1 b_0 \cdot ch \beta_1 (b_m \sin \omega t) + \alpha_1 ch \beta_1 b_0 \cdot sh(\beta_1 \sin \omega t) + \alpha_2 \omega b_m \cos \omega t \cdot [ch \beta_2 b_0 \cdot ch(\beta_2 b_m \sin \omega t) + sh \beta_2 b_0 \cdot sh(\beta_2 b_m \sin \omega t)] \quad (3.7)$$

Представимо в (3.7) гіперболічні функції рядами:

$$sh(x_m \sin \omega t) = 2[-jJ_1(jx_m)] \sin \omega t - 2jJ_3(jx_m) \sin 3\omega t - \dots,$$

$$ch(x_m \sin \omega t) = J_0(jx_m) + 2J_2(jx_m) \cos 2\omega t + \dots \text{ і, утримуючи гармоніки не вище}$$

другий, після перетворень одержуємо:

$$h = h_0 + m_1 \sin \omega t + n_2 \sin 2\omega t + m_2 \cos \omega t + n_1 \cos 2\omega t, \quad (3.8)$$

де  $h_0 = \alpha_1 sh \beta_1 b_0 \cdot J_0(j\beta_1 b_m)$ ;  $m_1 = \alpha_1 ch \beta_1 b_0 \cdot 2[-J_1(j\beta_1 b_m)]$ ;  $n_1 = \alpha_1 sh \beta_1 b_0 \cdot 2J_2(j\beta_1 b_m)$ ;

$m_2 = \alpha_2 \omega b_m \cdot ch \beta_2 b_0 \cdot J_0(j\beta_2 b_m) + 0,5\alpha_2 \omega b_m \cdot sh \beta_2 b_0 \cdot 2[-J_1(j\beta_2 b_m)]$ ;

$n_2 = 0,5\alpha_2 \omega b_m \cdot sh \beta_2 b_0 \cdot 2[-J_1(j\beta_2 b_m)]$ ;

Досліджуємо доданок  $h_0$  у формулі (3.8), оскільки саме ця складова напруженості магнітного поля приводить до насичення сердечника дроселя й, в остаточному підсумку, до відмови роботи приймача РК.

При кількісній оцінці залежностей напруженості поля від індукцій у формулі (3.6) і (3.8) використалися параметри:  $\alpha_1 = 2,1 \frac{A}{m}$ ,  $\beta_1 = 4,5 \frac{1}{Tl}$ ,  $\alpha_2 = 0,26 \frac{A}{m}$ ,  $\beta_2 = 0,77 \frac{1}{Tl}$ ,  $\gamma = 0,92 \frac{1}{Tl}$ ,  $A = 5,92$  (сталь марки 2412), перетин сердечника дроселя ДТ.1. 150  $29,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ , середня довжина магнітної силової лінії  $\ell = 0,58 \text{ м}$ , число витків  $W_0 = 16$ . Максимальні значення індукції  $b_m$  для різних довжин РК розраховані по формулі  $b_m = \frac{U_{D \max}}{4,44 fWS}$ , де  $U_D$  - напруга на основній обмотці дроселя, приймалося за довідковим даними й регульовальними таблицями фазочутливих РК 25 Гц [9, 11, 13]. Виявилось, що для РК довжиною 0,25...0...0,5км  $U_{D \max} = 1,45...2...2,5\text{В}$ ,  $b_m = 0,28...0...0,42\text{Тл}$ ; гранична напруженість поля  $h_{opr}$  лежить у діапазоні 240...280А/м, струм намагнічування  $I_0 = h_{opr} \cdot 0,036 = 8,5...9...9,5\text{А}$ , а струм асиметрії 17...19 А.

Стендові випробування схеми РК, показали, що граничний струм намагнічування дроселів, при якому приймач переходить у нульовий стан, досягає 8,4...9,25 А.

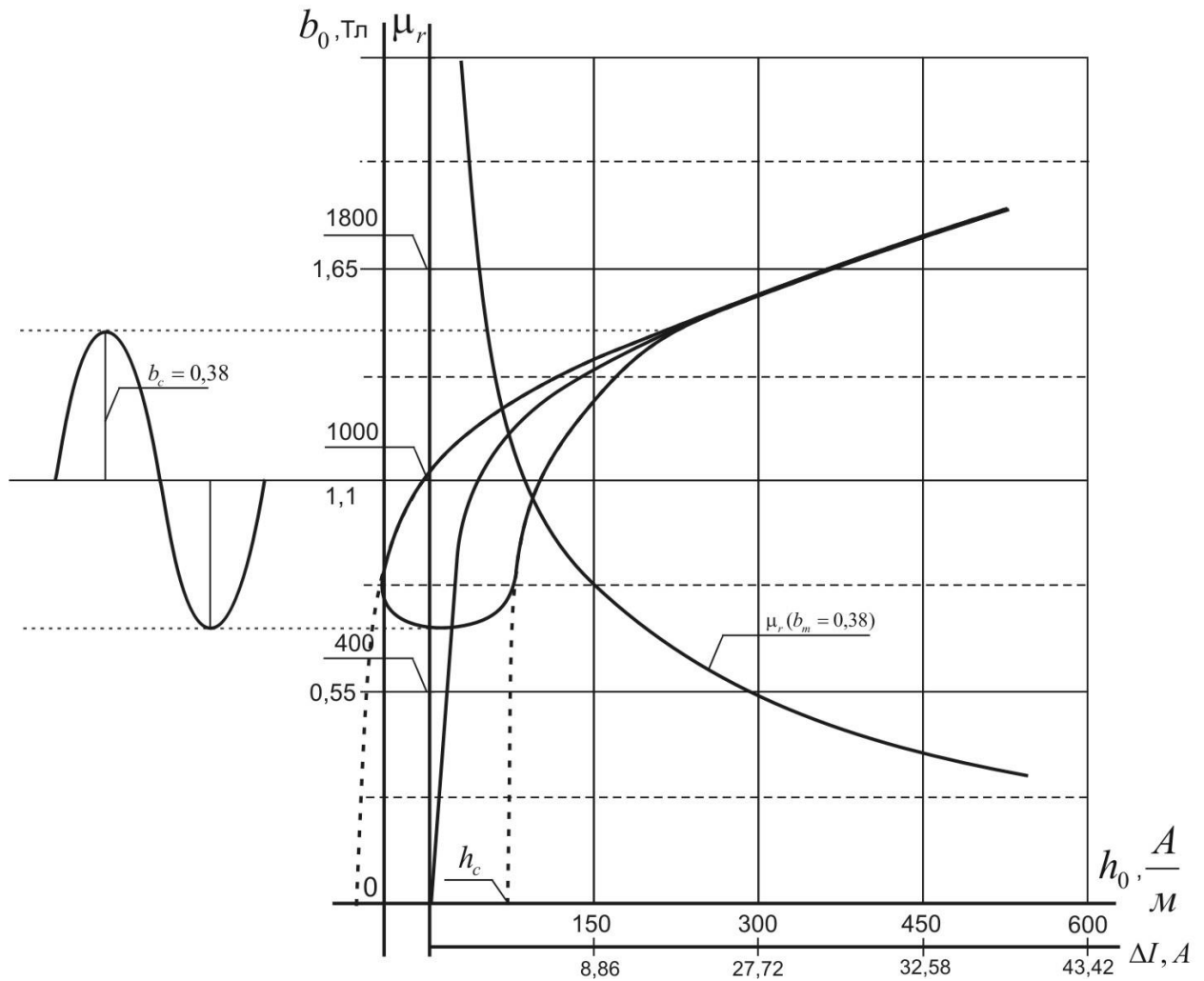


Рисунок 3.2 – Залежності  $h_0$  від  $b_0$  при  $b_m$  заданому і частоті 25 Гц (50 Гц від станції стикування = 0)

На рис. 3.2 показана крива намагнічування ОКН, апроксимована вираженням (3.6), і приватна петля гістерезису при індукції постійного поля (зсуву)  $b_0 = 1,1$  Тл; там же представлена крива реверсивної магнітної проникності  $\mu_r(h_0)$ , розрахована по формулі  $\mu_r \leq \text{tg} \alpha = \frac{\Delta b_0}{\Delta h_0} \cdot \frac{m_h}{m_b}$ , де  $\Delta b_0$ ,  $\Delta h_0$  - збільшення індукції й напруженості поля в  $i$ -ой крапці кривої  $b_0(h_0)$ ;  $m_b$ ,  $m_h$  - масштаби по осях координат.

Коерцитивна сила  $h_c$  ПГ визначена з обліком того, що безгістерезисна складова (3.6) дорівнює нулю, тоді  $h_c = \alpha_2 \omega b \cdot c h \beta_2 b_m = 62,2$  А/м, і максимальна індукція петлі відповідає  $b_m = b_0 + b_c = 1,4$  Тл. За заданим значенням  $\mu_r$  легко

визначаються індуктивність  $L_0$  й опір  $Z_0$  основної обмотки, а по ОКН – струм намагнічування.

Аргумент опору  $Z_0$  можна визначити по величині потужності втрат на вихрові струми й гістерезис [3, 5, 8]:

$$P_{B.T.} = V f_c \int_0^{2\pi} H dB, \quad (3.9)$$

де  $V$  - об'єм сердечника. Зрушення фаз між першими гармоніками ЕДС і струму обмотки визначається при напрузі  $u = U_m \sin \Omega t$ , якщо індукція й напруженість задані функціями:

$$B(t) = \sum_{n=1}^{\infty} B_{m_n} \sin(n\Omega t - \gamma_n), \quad i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_{m_n} \sin(n\Omega t + \psi_n). \quad (3.10)$$

З (3.10) і рівняння ланцюга, що намагнічує, обмотки дроселя ДТ.1 опором  $r$ :

$$ri + W_0 S \frac{dB}{dt} = u \quad (3.11)$$

для першої гармоніки одержуємо ЕДС і фазу  $E_1 = \Omega W_0 \Phi$ ;  $\psi_1 = \gamma_1 + \frac{\pi}{2}$ .

Підстановкою напруженості  $H_0 = \frac{iW}{l}$  й об'єму сердечника  $V = S \cdot l$  в (3.9)

знаходимо, що

$$P_{B.T.} = \Omega W_0 S [I_1 B_1 \sin(\gamma_1 - \psi_1)]. \quad (3.12)$$

Якщо індукція  $b_1 = b_0 + b_{1m} \sin(\Omega t - \gamma_1) = 1,1 + 0,38 \cdot \sqrt{2} \sin(157t - \gamma_1)$ , струм  $i = 2,6$  А (прийнятий по ОКН для  $b_0 = 1,1$  Тл),  $b_{1m} = 0,521$  Тл,  $r = 0,003$  Ом, тоді з (3.11) знаходимо, що  $E_{1m} = 2,174$  В; втрата напруги на опорі ланцюга  $7,8 \cdot 10^{-3}$  В, напруга  $u = 2,7178$  В, а повна потужність  $S = 2,7178 \cdot 2,6 = 7,066$  ВА. З (3.12) слід, що  $P_{B.T.} = 7,0563$  Вт. Аргумент опору  $Z_0$  становить  $\varphi = \arcsin \frac{P_{B.T.}}{S} = 86^{\circ}57'$ .

Аргумент опору  $Z_0$  можна знайти іншим способом. Магнітний потік (3.11), що проходить через листові смуги сердечника,

$$\dot{\Phi} = \frac{2\mu b h_0}{(1+j)\beta d} th \beta (1+j) \frac{d}{2}, \quad (3.13)$$

де  $h_0 = \frac{iW}{l}$ ,  $\beta = \sqrt{\pi f \mu_0 \mu_r \gamma}$ ,  $\gamma$  - провідність сталі ( $7 \cdot 10^3 \text{ 1/Ом} \cdot \text{мм}$ ),  $\mu_r$  - магнітна проникність приймалася 500,  $d = 0,055\text{м}$ ,  $b = 0,18\text{м}$  - товщина й ширина пакета пластин сердечника [3, 5, 8].

Виявляється можливим, використовуюючи (3.13), обчислити збільшення комплексного опору обмотки сердечника ДТ.1 за рахунок токовихревого ефекту:

$$\Delta Z = \frac{j2\mu_r S_{II} \Omega W^2}{(1+j)\beta l d} \text{th}\beta(1+j) \frac{d}{2}, \quad (3.14)$$

де  $S_{II} = a \cdot b$  - площа перетину пакета, обтічна потоком;  $a = 0,175\text{м}$  - висота пакета сталі.

Для низьких частот (менш 900 Гц)  $L_0 = \frac{\mu_0 \mu_r S W^2}{l}$ , де  $L_0$  - індуктивність обмотки по постійному струмі;  $S = 29,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$  - площа перетину магнітопровіда, охоплювана обмотками;  $l = 0,58\text{м}$  - середня довжина магнітної лінії для потоків. Тоді (3.14) можна записати у вигляді

$$\Delta Z = L_0 \frac{j2\Omega}{(1+j)\beta d} \text{th}(1+j) \frac{d}{2} \text{ й розкласти, потім, на речовинну й мниму частини. У}$$

результаті одержимо формули для оцінки індуктивності  $L = L_0 \frac{1}{x} \cdot \frac{\text{sh}x + \sin x}{\text{sh}x + \cos x}$  й

активного опору обмотки  $\Delta R = \omega L_0 \frac{1}{x} \cdot \frac{\text{sh}x - \sin x}{\text{sh}x + \cos x}$ . Повна індуктивність обмотки

$L = L_0 + \Delta L$ , а повний опір  $R = R_0 + \Delta R$ , де  $R_0 = \rho \frac{\ell_n}{S_n}$ ,  $\ell_n$ ,  $S_n$  - довжина й перетин

проведення.

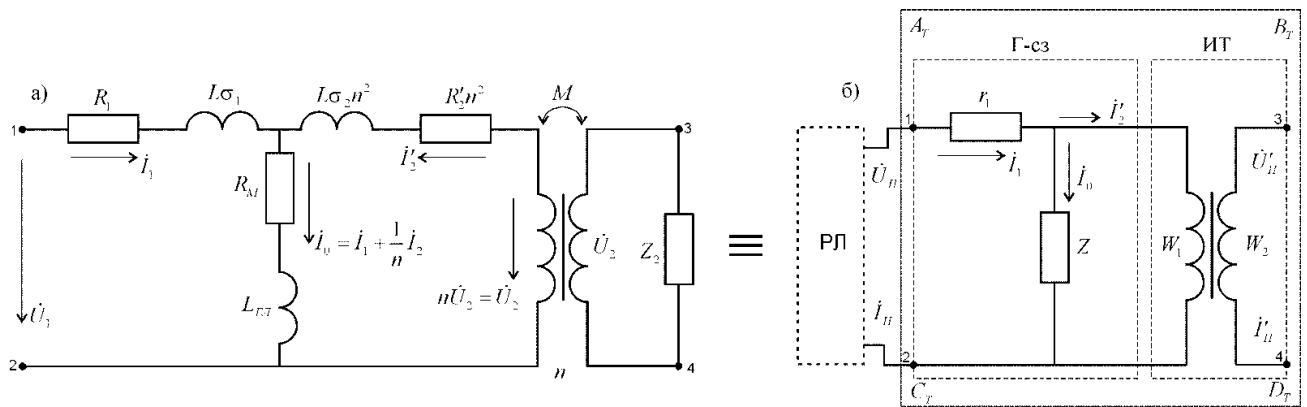


Рисунок 3.3 – Схема заміщення трансформатора: а) реального; б) розрахункова (з Г-образної схеми й ідеального трансформатора чотирьох полюсників)

Зупинимося на особливостях розрахунку рейкового кола з нелінійними феромагнетиками.

Розрахунки режимів роботи РК виробляються з використанням структурної схеми заміщення (рис. 3.3) ДТ представленою схемою Г-образного чотирьох полюсника й ідеального трансформатора.

Відшукування коефіцієнтів чотирьох полюсників (звичайно в А-формі), що містять нелінійні феромагнетики (ФМ) на всьому діапазоні зміни в сердечниках індукції, що перевищує область насичення, - досить важке завдання, оскільки класичні методи ХХ і КЗ стають не прийнятними. Запропонована методика розрахунку РК спрощує рішення названої проблеми.

Для розрахунків необхідно розташовувати петлю гістерезису (рис. 3.2) феромагнетику залежністю магнітної проникності  $\mu_r(h_0)$  від струму (напруженості) намагнічування. Далі з урахуванням (3.8) визначаються напруженість  $h_0$ , опір  $Z_0$  гілки намагнічування при заданій індукції й коефіцієнти А-матриці чотирьох полюсника розрахункової схеми заміщення ДТ.1.150 (рис. 3.3):

$$A_T = n \left( 1 + \frac{r_1}{z_0} \right), \quad B_T = nr_1, \quad C_T = \frac{1}{nz_0}, \quad D_T = \frac{1}{n}. \quad (3.15)$$

З розрахункової схеми заміщення дроселі виключені індуктивності розсіювання обмоток і наведений опір додаткової обмотки, що мало впливають на точність розрахунків.

Результати розрахунків двониткової фазочутливої РК частотою 25 Гц із використанням коефіцієнтів (3.15) при намагнічуванні дроселів по кінцях рейкового кола показали гарний збіг з даними, отриманими звичайним методом.

На рис. 3.4 представлені залежності напруги на вході приймача (типу ДСШ – 13А) від модуля опору  $Z_0$ . Видно, що гранична величина опору при насиченні обох дроселів досягне 0,44 Ом, що в 1,6 рази менше номінального значення. Перехід приймача в нульовий стан можливий при насиченні одного дроселя до опору  $Z_0 = 0,2$  Ом (рис. 3.4).

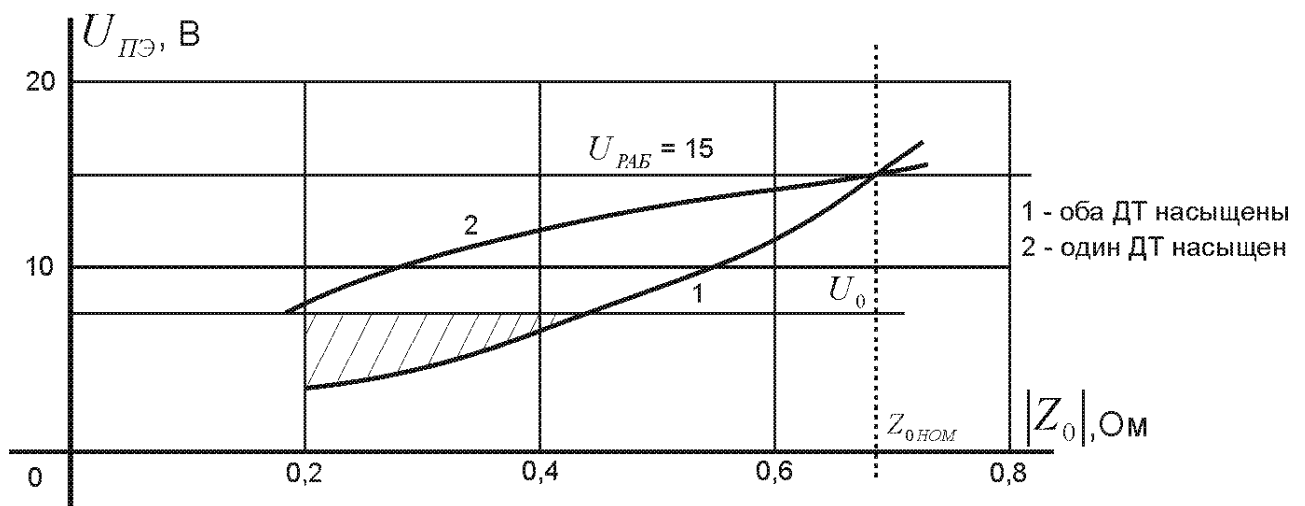


Рисунок 3.4 – Залежності напруги на приймачі від модуля опору  $Z_0$

Для рішення проблеми забезпечення завадостійкості рейкових кіл в умовах потужних перешкод тягового струму нами запропоновані кілька шляхів.

Перший з них класичний - застосування на станціях дроселів-трансформаторів з повітряним зазором типу ДТ.06.500С, застосовуваних на станціях стикування [2, 5].

Другий шлях рішення проблеми - за допомогою захисних комутуючих блоків [2, 5], що виключають шлях розтікання тягового постійного струму з рейкової мережі станції стикування у бік полігона електротяги змінного струму, що, крім насичення ДТ виключить електрокорозію опор і металевих елементів на відстані до 30 км від джерела перешкоди. Пристрій випробуваний у лабораторії ДПТА «Рейкові кола» й у польових умовах на станції стикування Пятихатки- Придніпровської залізн. і показав позитивний результат.

І, нарешті, третій – установка симетрируючих резистивних блоків [5] у коротких рейкових колах при електротязі змінного струму. Величини опорів резисторів блоків розраховані так, що істотно перевершують суму всіх опорів у схемі моста (рис. 3.1) рейкової лінії. Резистори блоків  $R_3$  (рис. 3.1) включаються послідовно із дросельними перемичками на одному з кінців рейкової лінії, що значно дешевше, ніж у випадку заміни дроселів.

### 3.3. Методика розрахунку асиметрії постійного струму по величині коефіцієнта асиметрії змінного струму.

Виміри показали, що коефіцієнт асиметрії тягового струму в рейковій лінії досягав 2,85...3...3 % З формули  $K_a = \frac{\Delta Z}{Z}$  треба, що

$\Delta Z = K_a \cdot Z\ell = 0,03 \cdot 0,8e^{j65^\circ} = 0,024e^{j65^\circ}$  Ом/км, де  $Z = z\ell$  - опір рейок при частоті струму 50 Гц,  $z$  - питомий опір рейок;  $\ell$  - довжина РК.

Розкладемо комплексну величину  $\Delta Z$  на складові

$$\Delta Z = (1,014 + j 2,175)10^{-2} = \Delta r_{pa} + j \Delta x_p, \text{ Ом/км}$$

Активний опір рейок відрізка колії опором  $\Delta Z$  становить  $1,014 \cdot 10^{-2}$  Ом/км. Відомо [1, 4, 6], що активний опір 1 км рейки

$$r_{pa} = \frac{0,91}{p} \sqrt{\mu}, \quad (3.16)$$

де  $P$  - периметр перетину рейки, див;

$\mu$  = відносна магнітна проникність сталі, що залежить від напруженості магнітного поля  $H=I_p/P$ ; досягає максимуму 400...600 при  $H = 6...10$  А/М (струм у рейках 400...600 А).

Установлено, що активний опір рейок перевищує електричне (омічне) опір постійному струму в  $K_p = 5...8...8$  раз.

Тоді омічний опір довжиною відрізка колії постійному струму складе

$$\Delta r_p = \frac{1,014 \cdot 10^{-2}}{5...8} = (0,2028 \dots 0,128) 10^{-2} \text{ Ом / км}, \text{ а коефіцієнт асиметрії по}$$

постійному струму

$$K_a = \frac{\Delta r_p}{K_p \cdot r \cdot \ell} = 4,08...6...6,55\%, \quad (3.17)$$

де  $r$  – питомий опір рейок постійному струму, і виявився трохи вище обмірюваного. З (3.17) видно, що коефіцієнт асиметрії визначається величиною  $\square r_p$ , що залежить від характеру несправності рейкової лінії, що приводить до того, що за інших рівних умов з укороченням РК асиметрія зростає.

### **3.4. Розробка технічних заходів, по зниженню впливу системи електропостачання на пристрої СЦБ на електрифікованих ділянках змінного струму, що примикають до станції стикування «П'ятихатки - Стикова».**

Рішення проблеми забезпечення працездатності рейкових кіл в умовах потужних перешкод постійного зворотного тягового струму на ст. П'ятихатки - Стикова, може бути здійснено декількома шляхами.

**Перший** з них – це застосування дросель-трансформаторів із сердечником з повітряним зазором, типу ДТ-06-500С, які використовуються на станціях стикування. Ці дросель-трансформатори можуть витримувати значний постійний струм асиметрії, не насичуючись, працюючи в лінійному режимі й забезпечуючи нормальну роботу рейкових кіл. При цьому варто

враховувати, що заміна дросель трансформаторів, навіть тільки в коротких рейкових колах, на станціях, приводить до значних витрат засобів. Це пояснюється тим, що тільки в одному нерозгалуженому рейковому колі буде потрібно замінити не менше двох дросель-трансформаторів, вартість яких у цей час достатньо висока.

Можливий також **другий** шлях рішення згаданої проблеми – розробка логіко-функціонального пристрою на базі МК-ОЭВМ, що могло б оцінити причину відмови РК, не створюючи погрози безпеки руху поїздів, і збільшити час утримання якоря сигнального реле світлофора на час відключення його ланцюга шляховим приймачем у результаті насичення дросель-трансформатора (порядку 5-8 с). По своїй сутності такий логічний пристрій представляє селектор часу, за допомогою якого забезпечується вповільнення на відпускання повторювача сигнального реле світлофора, як уже відзначено, або повторювача шляхового приймача, включеного в ланцюг сигнального реле. Більше того, такий пристрій міг би вирішувати більш широкий клас завдань по інформаційному забезпеченню систем автоматизації й підвищенню безпеки руху в екстремальних випадках поїзної обстановки. Разом з тим, розробка такого пристрою не входила до завдання досліджень справжньої роботи.

Нами запропонований **третій** шлях вирішення проблеми за допомогою технічного пристрою, що виключає шляхи розтікання зворотнього тягового постійного струму з рейкової мережі станції стикування у бік полігона електротяги змінного струму. За допомогою такого пристрою, крім того, вирішується проблема захисту споруджень, заземлених на рейки або прокладених уздовж шляхів, від електрокорозії.

Варіант такого пристрою був випробуваний в експлуатаційних умовах при моделюванні найбільш складних режимів роботи тягової мережі й показав задовільні результати.

## **Висновок**

У результаті проведених аналітичних досліджень та розрахунків було визначено, що досить більші постійні струми натікають на ДТ станції «Зелена», розташованої на відстані близько 20 км від станції стикування «П'ятихатки – Стикова» (рис.1.4). А при відключенні ТП «П'ятихатки» струми різко зростають особливо при високому перехідному опорі «рейка – земля» у зимовий період при сильних морозах й у літній період при сухій і жаркій погоді (рис.1.7, рис. 1.8). За рахунок поздовжньої й поперечної асиметрії РК викликаній станом шляхових з'єднувачів струмопровідних стиків, зусиллям затягування болтів шляхових неполадок, станом заземлення опор контактної мережі й інших споруджень, заземлених на рейки, відбувається підмагнічування магнітопровід шляхових ДТ типу ДТ.1.150, що може привести до збою в роботі пристроїв СЦБ.

### **Висновок щодо впровадження методу розрахунку рейкових кіл з використанням підмагнічування феромагнетика (ДТ):**

- 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.

### **Вплив асиметрії:**

- Установлено, що причиною відмов РК є насичення магнітопровода феромагнетиків (ДТ) в умовах асиметрії рейкової лінії, при цьому асиметрія по постійному струмі, що намагнічує ФМ, в 4 ... 5 разів перевищує асиметрію по змінному струмі.
- За допомогою нового методу розрахунку РК із застосуванням математичної моделі перемагнічування феромагнетиків отримана кількісна оцінка предельно-допустимих струмів асиметрії й вхідних опорів по кінцях ланцюга, що викликають відмову пристроїв СЦБ.
- Сформульовано технічні заходи щодо підвищення завадостійкості й захисту рейкових кіл в умовах дії потужних перешкод тягового струму.

Виходячи з вище сказаного, для більш надійної роботи пристроїв СЦБ поблизу станції стикування вигідно блокувати витікання постійного тягового струму в бік полігону змінного тягового струму (такий пристрій розроблено співробітниками каф. АТ – силовий комутуючий захисний блок СКЗБ), та використання ДТ-06-500С. При асиметрії рейкової лінії, запропоновано проводити регулювання РК з урахуванням підмагнічування ФМ.

## 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. Технічний звіт за договором № ПР/НТО – 952201/НЮ-64\05-СНЦ з ДП «Придніпровська залізниця».
6. 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.
7. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров / А. Анго. – Москва : Наука, 1965. – 780 с.
8. Андреев В. С. Теория нелинейных электрических цепей / В. С. Андреев. – Москва : Радио и связь, 1982. – 280 с.

9. Аркатов В. С. Рельсовые цепи. Анализ работы и техническое обслуживание / В. С. Аркатов, Ю. А. Кравцов, Б. М. Степенский. – Москва : Транспорт, 1990. – 295 с.
10. Аркатов В. С. Рельсовые цепи магистральных железных дорог / В. С. Аркатов, Н. В. Котляренко, А. И. Баженов. – Москва : Транспорт, 1982. – 364 с.
11. В.С. Аркатов Н.Ф. Котляренко Рельсовые цепи магистральных железных дорог/Справочник/ Под ред. В.С. Аркатова М/Транспорт 1982
12. В.С. Аркатов, Ю.А. Кравцов, Б.М. Стесинский. Рельсовые цепи. // М.: Транспорт, 1990. с. 291.
13. А.М. Брылеев, А.В. Шишляков, Ю.А. Кравцов. Устройства и работа рельсовых цепей // М.: Транспорт, 1965. с. 256.