

МЕХАНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра “Системи електричної тяги”

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

**З ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ СИСТЕМ
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

Розділ 2

**Електромагнітна сумісність тягової підстанції змінного
струму з живильною та контактною мережами**

Харків 2009

Лабораторний практикум розглянуто і рекомендовано до друку на засіданні кафедри “Системи електричної тяги” 30 серпня 2006 р., протокол №1.

Лабораторний практикум призначено для студентів, які вивчають дисципліну “Електромагнітна сумісність систем електропостачання залізничного транспорту”.

Наведений матеріал та методи експериментальних досліджень можуть бути додатково використані при виконанні практичних занять, курсових проектів і робіт, дипломного проектування та науково-дослідних робіт студентів зі спеціальності “Електричні системи та комплекси транспортних засобів”.

Укладачі:

проф. Я.В. Щербак,
доценти Є.С. Гапчинський,
Д.Л. Сушко

Рецензент

доц. В.Я. Кузнецов

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ
З ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ СИСТЕМ
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Розділ 2

Електромагнітна сумісність тягової підстанції змінного струму з живильною та контактною мережами

Відповідальний за випуск Сушко Д.Л.

Редактор Еткало О.О.

Підписано до друку 23.10.06 р.

Формат паперу 60x84 1/16. Папір писальний.

Умовн.-друк.арк. 3,25. Обл.-вид.арк. 3,75.

Замовлення № Тираж 100. Ціна

Видавництво УкрДАЗТу, свідоцтво ДК № 2874 від. 12.06.2007 р.

Друкарня УкрДАЗТу,
61050, Харків - 50, пл. Фейербаха, 7

ЗМІСТ

Вступ	4
Лабораторна робота 1 Дослідження екрануючої дії рейок	5
Лабораторна робота 2 Дослідження екрануючої дії відсмоктувальних трансформаторів	36
Лабораторна робота 3 Дослідження екрануючої дії відсмоктувальних трансформаторів зі зворотним проводом	48
Список літератури	60

ВСТУП

У відповідності до визначення Міжнародної електротехнічної комісії (МЕК) під електромагнітною сумісністю розуміється здатність електротехнічного обладнання задовільно функціонувати в електромагнітному середовищі, не створюючи недопустимого впливу на інше обладнання та зовнішнє середовище.

Електрична залізниця у своєму складі має електричні системи, які характеризуються несиметрією і передачею електричної енергії з несинусоїдальним змінним та пульсуючим постійним струмами.

Перетворення на тягових підстанціях або рухомому складі електричної енергії змінного струму в енергію постійного струму і навпаки пов'язано зі значними величинами реактивної енергії. Крім того, дискретний характер перетворення електричної енергії і наявність нелінійних елементів у напівпровідникових перетворювачах викликає споживання із мережі несинусоїдального струму, що спричиняє спотворення форм напруг живильної електричної системи.

Електрична тяга змінного струму є потужним однофазним навантаженням, що викликає несиметрію в живильній трифазній мережі. Наявність несиметрії трифазної мережі є причиною появи у випрямленій напрузі додаткових гармонічних складових, що підвищують вплив на суміжні системи.

Для розв'язання задачі пошуку шляхів поліпшення електромагнітної сумісності систем тягового електропостачання із суміжними системами необхідно чітко уявляти електромагнітні процеси, що протікають в цих системах. Чітке уявлення сутності процесів, що протікають в системах тягового електропостачання є умовою поліпшення їх електромагнітної сумісності. Даний підхід покладено в основу лабораторного практикуму.

Лабораторний практикум з курсу "Електромагнітна сумісність систем електропостачання залізничного транспорту" включає роботи з вивчення гармонічного складу вхідного струму та вихідної напруги підстанції постійного струму; вивчення впливу несиметрії живильної мережі на гармонічні складові струмів і напруг; вивчення шляхів зменшення змінної складової випрямленої напруги на суміжні системи.

Підготовку до лабораторних робіт рекомендується виконувати в такому порядку:

- вивчити теоретичний матеріал за відповідним розділом;
- виконати попереднє розрахункове завдання;
- вивчити робоче завдання та методичні вказівки до його виконання.

Попереднє розрахункове завдання виконується в зошиті, що служить лабораторним матеріалом під час всього лабораторного практикуму, куди заносяться у вигляді таблиць результати експериментальних досліджень. Графіки будуються на міліметровому папері, який вкладається в журнал. Кожен студент веде журнал індивідуально і передає його викладачеві у вигляді звіту про виконані роботи при захисті.

Лабораторна робота 1

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКРАНУЮЧОЇ ДІ РЕЙОК

1.1 Визначення індуктивного магнітного впливу тягової мережі без відсмоктувальних трансформаторів

1.1.1 Небезпечний вплив тягової мережі

Особливість роботи мережі полягає в тому, що її навантаження безупинно переміщується по фідерній зоні і змінюється по величині. Навантаження можуть змінюватися в досить широких межах у залежності від кількості електропоїздів, їх ваги, способу ведення поїзда, швидкості, профілю колії. Зі зміною місця розташування навантажень і їх величин одночасно змінюються й індуковані напруги в комунікаціях, прокладених уздовж полотна залізниці.

Найбільш практичним є визначення максимальної індукованої напруги, тому що ця величина характеризує ступінь небезпеки для обслуговуючого персоналу, а також обумовлює найбільше погіршення якості і надійності роботи пристроїв зв'язку та СЦБ. Максимальні індуковані небезпечні значення напруг виникають, як правило, при роботі електрифікованої ділянки у змушеному режимі.

Максимальну індуквану напругу необхідно визначати також в аварійному режимі (коротке замикання в контактній мережі), що характеризується порівняно невеликою тривалістю (десяті частки секунди). Для цих двох режимів установлені норми [3].

В даний час при змушеному режимі вплив на величину індуктивних небезпечних напруг, розподілених вздовж фідерної зони навантажень, створених електрорухомим складом, враховують, замінюючи реальне розташування навантажень розрахунковою схемою [2]. У цій схемі приймається, що всі електропоїзди знаходяться на рівній відстані один від іншого і створюють однакове навантаження; тоді навантаження вздовж фідерної зони одноколіїної ділянки змінюється східцями (рисунок 1.1).

Індуктивну небезпечну напругу при цьому розраховують по еквівалентному струму, що впливає, $I_{екв.}$, під яким мають на увазі струм, однаковий по всій довжині зближення і який індукує в комунікації таку ж небезпечну напругу, як і всі струми (при їхньому східчастому розподілі) у контактній мережі. Для розрахункового режиму короткого замикання аварійний струм по всій довжині зближення однаковий, тому він є еквівалентним впливаючим струмом.

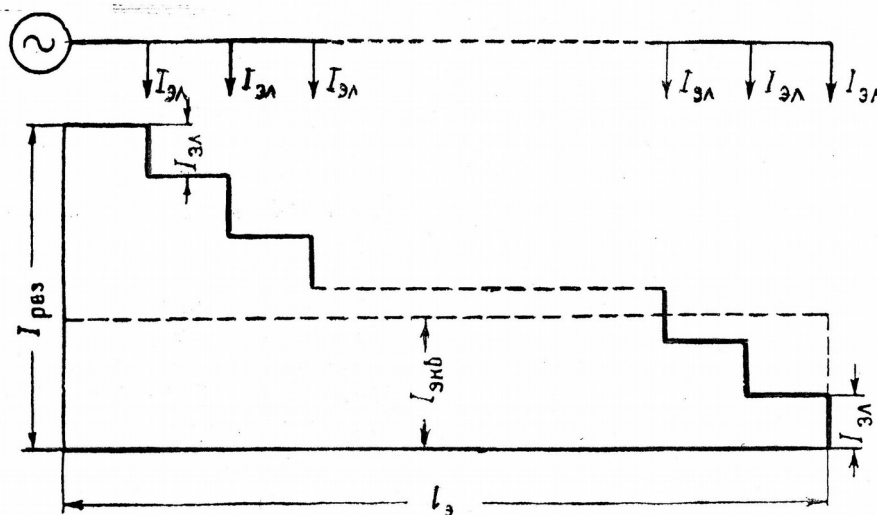


Рисунок 1.1 – Розподіл струму навантаження вздовж фідерної зони

Ефективне значення небезпечної напруги між комунікацією і землею на одному з кінців її ділянки, гальванічно нерозділеного й ізольованого по всій довжині, при заземленні комунікації на протилежному кінці і паралельному зближенні на одноколіїній ділянці визначається як

$$U = -k_{\phi} \cdot z_{ка} \cdot v_{\epsilon} \cdot r \cdot I_{екв} \cdot l_a, \quad (1.1)$$

де k_{ϕ} – коефіцієнт, що враховує форму кривої індукованої напруги;

$z_{ка}$ – повний погонний опір взаємоіндукції між контактною мережею і комунікацією, Ом/км;

r – результуючий коефіцієнт захисної дії рейок r_p , заземлених проводів $r_{пр}$, оболонки $r_{об}$ і сусідніх жил кабелю $r_{ж}$:

$$r = r_p \cdot r_{пр} \cdot r_{об} \cdot r_{ж},$$

де v_{ϵ} – коефіцієнт, що характеризує хвильовий процес у комунікації, яка піддана впливу:

$$v_{\epsilon} = \frac{ch\gamma_a l_c}{ch\gamma_a l},$$

де γ_a – постійна поширення для комунікації, 1/км;

l_c – відстань від середини довжини зближення до кінця комунікації, км;

l – довжина комунікації;

l_a – довжина зближення комунікації з тяговою мережею, км.

На двоколіїній ділянці струми в контактній мережі обох колій у загальному випадку не однакові. Результуючі коефіцієнти захисної дії КЗД рейок однієї й другої колій різні внаслідок залежності r_p від відстані між комунікацією і контактною мережею. Тому для двоколіїної ділянки зручно представити індуковану напругу, яка складається з двох частин, кожна з яких обумовлена впливом струму однієї колії. Величини, що відносяться до першої колії, тут і надалі позначимо індексом ', до другої колії – індексом ", а до двоколіїної ділянки в цілому – індексом I-II. Тоді

$$U_{(I-II)} = U' + U'' . \quad (1.2)$$

Приймаємо, що між результуючими струмами $I_{рез}$ обох колій існує така залежність:

$$\alpha = \frac{I'_{рез}}{I''_{рез}}; \quad (1.3)$$

причому $I'_{рез} + I''_{рез} = I_{рез(I-II)}$.

Струм $I_{рез}$ являє собою суму навантажень від усіх електричних локомотивів на розглянутій фідерній зоні. Величини результуючого й еквівалентного впливаючого струмів зв'язані співвідношеннями

$$\begin{aligned} I_{екв} &= k_m \cdot I_{рез}; \\ I_{екв(I-II)} &= k_{m(I-II)} \cdot I_{рез(I-II)}; \end{aligned} \quad (1.4)$$

де k_m – коефіцієнт, що характеризує зміну еквівалентного струму в залежності від кількості електровозів m_a , що одночасно знаходяться в межах довжини зближення.

Відповідно до виразів (1.1) і (1.2), з огляду на співвідношення (1.3), одержимо:

$$U' = -k_\phi \cdot k_{m(I-II)} \cdot z'_{ка} \cdot v_\epsilon \cdot r'_{рз} \cdot r_a \cdot \frac{\alpha \cdot I_{рез(I-II)}}{1 + \alpha} \cdot l_a; \quad (1.5)$$

$$U'' = -k_\phi \cdot k_{m(I-II)} \cdot z'_{ка} \cdot v_\epsilon \cdot r'_{рз} \cdot r_a \cdot \frac{I_{рез(I-II)}}{1 + \alpha} \cdot l_a; \quad (1.6)$$

$$U_{(I-II)} = -k_\phi \cdot k_{m(I-II)} \cdot v_\epsilon \cdot r_a \cdot \frac{I_{рез(I-II)}}{1 + \alpha} \cdot l_a \cdot \left(\alpha \cdot r'_{рз} \cdot z'_{ка} + r''_{рз} \cdot z''_{ка} \right), \quad (1.7)$$

де r_a коефіцієнт екрануючої дії заземлених проводів оболонки кабелю і його жил для двокільної ділянки:

$$r_a = r_{пр} \cdot r_{об} \cdot r_{жс}.$$

1.1.2 Активний опір проводів та рейок на лініях однофазного струму

Рейкова колія

На лініях змінного струму на головних і станційних коліях застосовують, як несучий, біметалічний трос ПБСМ1 і ПБСМ2 перерізом 70 або 95 мм². Контактні проводи на головних коліях мають переріз 100 мм², а на станційних – 85 мм². Електричні характеристики проводів наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Марка проводу	Площа поперечного перерізу, мм ²	Електричний опір перерізу 1 км проводу при 20 °С, Ом/км	Вага 1 км проводу, кг
МФ-85*	85	0,211	755
МФ100	100	0,177	890
МФ-150	150	0,118	1335
БрФ-85	85	0,229	755
БрФ-100	100	0,205	890
М-95	92,5	0,200	837
М-120	117	0,158	1058
ПБСМ1-70	72,2	0,731	606
ПБСМ1-95	93,3	0,563	783
ПБСМ2-70	72,2	0,921	597
ПБСМ2-95	93,3	0,704	770
С-70	72,2	—	620
А-120	117	0,27	322
А-150	148	0,21	407
А-185	183	0,17	503
АС-35	36,9/6,2**	0,85	150
АС-95	94,4/15,9	0,33	386
АС-120	115,0/22,0	0,27	492

*Для проводів МФО приймаються ті ж значення, що і для МФ.
 **У чисельнику – переріз алюмінію, у знаменнику – переріз сталі.

Якщо в мережах постійного струму зустрічається тільки одне поняття опору проводів, то при змінному струмі вводяться поняття активного, реактивного і повного опору. Як відомо, при

протіканні змінного струму по проводу явище поверхневого ефекту веде до збільшення опору проводу змінного струму в порівнянні з опором постійного струму. Такий опір називається активним і його відношення до опору постійному струму оцінюється як

$$k = \frac{r_a}{r},$$

де r_a – активний опір при змінному струмі, Ом/км;

r – опір при постійному струмі, Ом/км.

Явище поверхневого ефекту позначається тим сильніше, чим більша частота струму, поперечний переріз провідника, чим менша його поверхня і чим більша магнітна проникність матеріалу, з якого виготовлений провідник. Для мідних і алюмінієвих проводів, застосованих у контактній мережі, і при частотах, що мають місце на електрифікованих залізницях змінного струму, явищем поверхневого ефекту можна знехтувати, тобто $k=1$.

Найбільш складне визначення активного опору провідників з феромагнітних матеріалів і рейок. Складність в тому, що магнітна проникність матеріалів рейок залежить від величини струму, що протікає по них. Величина струму, що протікає по рейках, залежить від їхнього опору, і чим він більший, тим менший струм у рейках, тобто тим більша частина струму відгалужується в землю. У зв'язку з цим визначення струму в рейках зводиться до розрахунку струморозподілу в складній мережі з нелінійними параметрами. Для спрощення практичних розрахунків приймається ряд допущень. В кожному випадку ці допущення будуть розглянуті нижче.

Розглянемо залежність активного опору рейки від струму, що протікає в ньому. Для визначення активного опору масивних сталевих проводів найбільше застосування знайшли емпіричні формули. Для розрахунків активного опору рейок використовують емпіричні формули Циклера. Ці формули були перевірені дослідями, проведеними в лабораторіях Всесоюзного електротехнічного інституту (ВЕІ).

Згідно з цими формулами:

$$\left. \begin{aligned} k &= 1 + 0.84\beta^2; \text{ при } \beta \leq 1 \\ k &= 0.758 + \sqrt{1.343\beta^2 - 0.183}; \text{ при } 1 \leq \beta \leq 3 \\ k &= 0.758 + 1.159\beta; \text{ при } \beta \geq 3 \end{aligned} \right\}, \quad (1.8)$$

$$B = 2 \cdot 10^{-2} \frac{S}{P} \sqrt{\frac{f}{\rho}} \mu;$$

де S – площа поперечного перерізу рейок, см^2 ;

P – периметр перерізу рейки, см ;

f – частота струму, Гц ;

ρ – питомий опір рейкової сталі, $\text{Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$;

μ – відносна магнітна проникність матеріалу рейки.

Остання величина залежить від напруженості поля H , А/см , на поверхні рейки, що визначається за формулою

$$H = \frac{0.4\pi I_p}{P}, \quad (1.9)$$

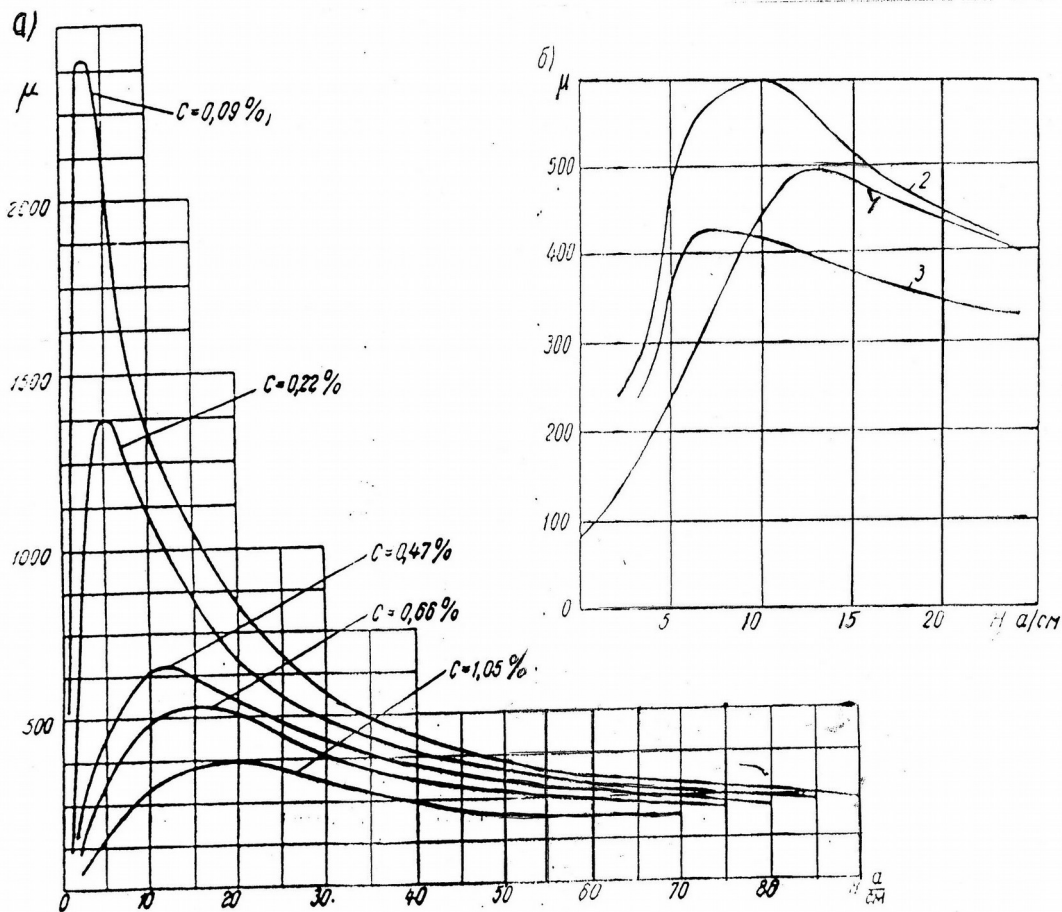
де I_p – струм, що протікає по рейці, А .

Значення площі поперечного перерізу рейок, периметра перерізу і відношення $\frac{S}{P}$ наведені в таблиці 1.2. Там же дані значення $H' = \frac{H}{I_p}$ (напруженості при струмі $I_p=1 \text{ А}$) для різних типів рейок.

Точні результати можна одержати, маючи графіки залежності $\mu = \varphi(H)$, побудовані для даного сорту сталі на основі спеціально проведених дослідів. Однак при великій невизначеності ряду інших факторів, що беруть участь у розрахунку, можна обмежитися наявними в літературі даними. На рисунку 1.2 дані такі графіки для гарячекатаної сталі з різним вмістом вуглецю.

Таблиця 1.2

Тип рейки	$S, \text{см}^2$	$P, \text{см}$	$\frac{S}{P}$	$H' = \frac{H}{I_p}$
P65	82,9	70	1,18	0,018
P50	65,8	62	1,06	0,020
P43	57,0	56	1,02	0,022



а – для провідників зі сталі з різним вмістом вуглецю;
 б – для залізничних рейок

Рисунок 1.2 – Залежність відносної магнітної проникності від напруженості магнітного поля

Як показує дослід, струм у рейках може мінятися в досить широких межах (практично від 0 до кількох сотень ампер) і настільки ж може змінюватися і величина H .

Як видно з кривих $\mu = \varphi(H)$ (рисунок 1.2, а), магнітна проникність збільшується при збільшенні H (а отже, і струму в рейках) у зонах малого насичення, тобто до досягнення магнітної проникності, і навпаки, за межами цього максимуму – падає при збільшенні струму. Цікаво установити, яка частина у кривій $\mu = \varphi(H)$ має значення для розрахунку активного опору рейок у практичних умовах. На рисунку 1.2, а для рейкової сталі (з вмістом вуглецю близько 0.5%) крива $\mu = \varphi(H)$ має максимум для $H = 10-12$ А/см. Струм у рейці, що відповідає цим значенням H ,

можна знайти для різних типів рейок, використовуючи дані таблиці 1.2, з формули $I = \frac{H}{H'}$. Тоді одержимо, що максимум μ відповідає струму в рейці від $\frac{10}{0,022}$ до $\frac{12}{0,018}$, тобто від 450 до 670 А. У двох рейках однієї колії виходять значення струму від 900 до 1340 А і ще вдвічі більше – для двоколіїної ділянки. Такі значення струмів у рейках значно перевищують робочі струми, що мають місце на залізницях змінного струму. Це говорить про те, що рейки на електрифікованих ділянках однофазного струму працюють у зоні слабких полів і, отже, зі збільшенням струму в рейках їхня магнітна проникність і активний опір ростуть. На рисунку 1.2, б дані криві, зняті для цієї частини напруженості магнітного поля. Крива 1 побудована за даними ЛІЗТу, крива 2 – за даними ВЕІ, крива 3 за даними магнітної лабораторії Академії наук СРСР.

Визначимо активний опір рейок для значень струму в межах від 0 до 300 А. Задаючи величини струму 0, 100, 200 і 300 А, знайдемо відповідні значення H (скориставшись таблицею 1.2) і потім для кожного значення H - відносну магнітну проникність μ (узятую як середнє з кривих рисунка 1.2, б). Знаючи величину μ і прийнявши для рейок $\rho = 0,21 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$, можна знайти значення коефіцієнта β , використовуючи дані таблиці 1.2. Далі за однією з формул (1.8) (обираної в залежності від величини коефіцієнта β) можна знайти значення k . Помноживши на k омичний опір рейок, одержимо активний опір цілої рейки. Результати такого розрахунку зведені в таблиці 1.3.

Для визначення опору феромагнітних провідників проф. Л. Р. Нейман запропонував розрахункову формулу:

$$r = \frac{0,28}{P} \sqrt{\mu \rho f} \quad (1.10)$$

Підставивши в (1.10) $\rho = 0,21 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ і $f = 50 \text{ Гц}$, одержимо

$$r_{pa} = \frac{0,91}{P} \sqrt{\mu} \quad (1.11)$$

Напруженість поля при цьому розраховується за формулою

$$H = \frac{I_p}{P}$$

Таблиця 1.3

I, A	$H, A/cm$	μ	β	k	$r_{pa}, \text{Ом/км}$
Рейки типу Р65					
0	0	100	3,56	4,9	0,124
100	1,8	120	3,96	5,4	0,137
200	3,6	250	5,62	7,3	0,185
300	5,4	380	6,91	8,76	0,220
Рейки типу Р50					
0	0	100	3,12	4,4	0,143
100	2,0	130	3,56	4,9	0,159
200	4,0	270	5,12	6,8	0,220
300	6,0	400	6,23	8,0	0,260
Рейки типу Р43					
0	0	100	3,00	4,24	0,160
100	2,2	135	3,50	4,8	0,181
200	4,4	310	5,30	6,8	0,256
300	6,6	420	6,20	8,0	0,302

Зіставивши результати обох розрахунків (таблиця 1.3 і 1.4), бачимо вдалий збіг. Значення активних опорів рейок у таблиці 1.3 і 1.4 наведені для однієї цілої рейки, тобто без урахування збільшення опору за рахунок стиків. Згідно з даними розрахунків рейкових кіл автоблокування [4] опір стиків приймається рівним 0,024 Ом/км (при довжині ланки 12,5 м). Узявши середні значення активних опорів рейок з таблиці 1.4 і додавши опір стику, одержимо опори однієї нитки рейок однофазному струму промислової частоти (таблиця 1.5).

З таблиці видно, що активний опір рейок перевищує омичний в залежності від величини протікаючого струму.

Зробимо розрахунки активного опору рейок для тих же умов, що й вище, але за формулою (1.11). Дані розрахунків зведені в таблицю 1.4.

Таблиця 1.4

I_p, A	$H = \frac{I_p}{P}$	μ	r_{pa} за формулою
----------	---------------------	-------	----------------------

			(1.11), Ом/км
Рейки типу Р65			
0	0	100	0,130
100	1,4	112	0,138
200	2,9	180	0,175
300	4,3	300	0,226
Рейки типу Р50			
0	0	100	0,147
100	1,6	118	0,160
200	3,2	210	0,214
300	4,9	344	0,274
Рейки типу Р43			
0	0	100	0,163
100	1,8	134	0,187
200	3,6	250	0,258
300	5,4	380	0,318

Таблиця 1.5

Струм, А	Опір однієї нитки рейок однофазному струмові промислової частоти, Ом/км, для рейок типу		
	Р 65	Р 50	Р 43
0	0,15	0,17	0,19
100	0,16	0,18	0,21
200	0,20	0,24	0,28
300	0,25	0,29	0,33

1.1.3 Екрануюча дія рейок

Зниження індукованої напруги внаслідок компенсуючої дії струмів, що протікають по рейковій мережі, прийнято характеризувати коефіцієнтом екрануючої дії рейок, який визначається за формулою

$$r_p = 1 + K_d \cdot \frac{I_{p.sp}}{I_k} \quad (1.12)$$

де $I_{p.cр}$ – середній струм у рейковій мережі.

Коефіцієнт K_d характеризує зміну екрануючої дії рейок у залежності від розташування комунікації, підданої впливові, відповідно контактній і рейковій мережам:

$$K_d = \frac{Z_{pa}}{z_{ka}}.$$

Поблизу тягової підстанції величина струму в рейковій мережі більша, ніж усередині між підстанцією і навантаженням. Тому екрануюча дія рейок для комунікацій, що мають порівняно невелику довжину зближення (близько декількох кілометрів) залежить від розташування останніх. Коли комунікації розташовані поблизу тягової підстанції, екрануюча дія рейок поліпшується внаслідок збільшення струму в рейках, що примикають до підстанції. Коли об'єкт розташований на відстані l_k від підстанції, одержимо:

$$I_{p.cр} = -I_k \cdot \left[(I - K_l) \cdot \frac{I}{\gamma_p \cdot l_a} \cdot C + K_l \right]. \quad (1.13)$$

$$I_{p.cр}'' = I_k \cdot (I - K_l) \frac{I}{\gamma_p \cdot l_a} D. \quad (1.14)$$

За формулами (1.12) і (1.13) визначимо середній струм у рейках для розглянутої ділянки:

$$I_{p.cр} = -I_k \cdot \left[(I - K_l) \cdot (C + \varepsilon_i D) \cdot \frac{I}{\gamma_p \cdot l_a} + K_l \right], \quad (1.15)$$

де

$$\varepsilon_i = -\frac{I_{k2}}{I_{k1}}.$$

Коефіцієнт екрануючої дії рейок на довжині зближення треба визначити за формулою

$$r_p = 1 - K_d \cdot \left[(1 - K_l) \cdot (C + \varepsilon_l D) \cdot \frac{l}{\gamma_p \cdot l_a} + K_l \right]. \quad (1.16)$$

Вираз (1.16) дійсний при будь-якій відстані від навантаження до тягової підстанції. Аналіз цього виразу показує, що якщо $l_H > 5 \text{ км}$ і $l_3 > 10 \text{ км}$, то r_p можна вважати постійним, який не залежить від довжини зближення, і визначити за формулами для одноколійної ділянки:

$$r_p = 1 - K_d \cdot K_l; \quad (1.17)$$

для кожної колії двоколійної та багатоколійної ділянки:

$$\begin{aligned} r'_{p3} &= 1 - K'_{d3} \cdot K'_{l3}; \\ r''_{p3} &= 1 - K''_{d3} \cdot K''_{l3} \text{ і т.д.}, \end{aligned} \quad (1.18)$$

де

$$K'_{d3} = \frac{z'_{pa3}}{z'_{ka}}; \quad K'_{l3} = \frac{z'_{kp3}}{z'_{p3}} \quad \text{і т. д.}$$

При довжині l_p , рівній декільком кілометрам, можна вважати $e^{-\gamma l/p} = 0$, тоді одержимо

$$I_{p.sp} = -K_1 \cdot I_k.$$

Криві, побудовані за формулами (1.16) і (1.17), показують, що захисна дія рейок для комунікацій, розташованих в декількох кілометрах від підстанції (рисунки 1.3, а), може бути вище, ніж усередині фідерної зони, а для комунікацій, розташованих далеко від підстанції (рисунки 1.3, б) істотно поліпшується зі збільшенням кількості тягових рейок (на багатоколійних ділянках і в межах станцій).

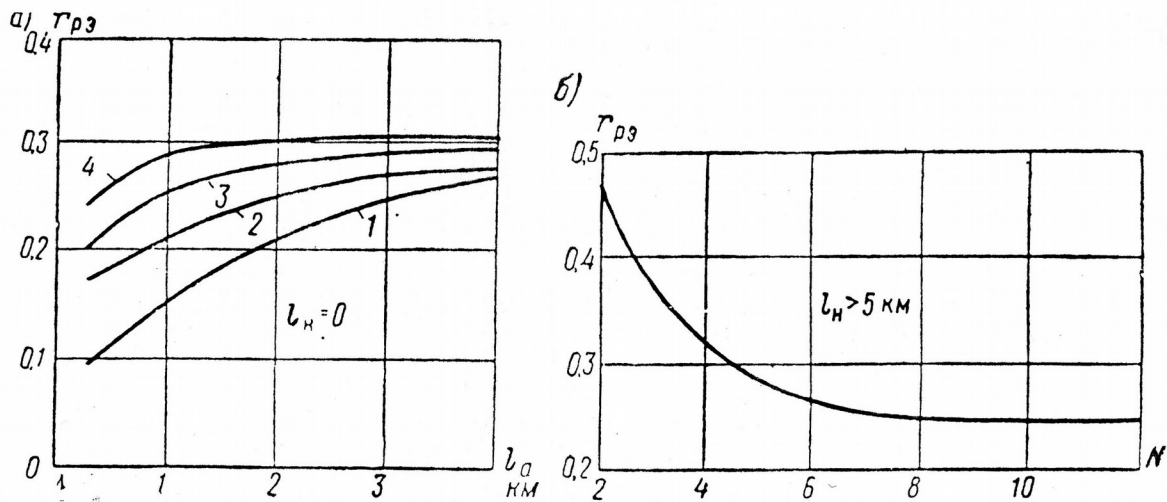


Рисунок 1.3 – Коефіцієнт r_{p3} поблизу тягових підстанцій двоколіїної ділянки (а) і на станціях (б) у залежності від l_a при $l_H = 0$ і числа рейкових ниток N при $l_H > 5$ км:

$$1 - z_3 = \infty; \varepsilon_1 = 1; 2 - z_3 = \infty; \varepsilon_1 = 0;$$

$$3 - z_3 = 0,5 \text{ Ом}; \varepsilon_1 = 1; 4 - z_3 = 0,5 \text{ Ом}, \varepsilon_1 = 0$$

Чим ближче до підстанції розташована піддана впливові комунікація, тим вище екрануюча дія рейок. Останнє істотно залежить від співвідношення струмів ε_1 фідерів підстанції по напрямках: чим менше модуль величини ε_1 (при її фазовому куті, звичайно рівному 60°), тим гірше екрануюча дія рейок. Як розрахункову варто приймати величину r_p , що відповідає найменшому практично можливому співвідношенню струмів ε_1 і мінімальному перехідному опору рейки – земля. Внаслідок порівняно невеликого опору розтіканню ланцюга відсмоктування велика частина зворотного струму поблизу підстанції проходить по цьому ланцюгу. Тому ефект поліпшення екрануючої дії рейок біля підстанції виявляється значно слабше. У ряді випадків можна вважати, що екрануюча дія рейок внаслідок збільшення струму поблизу підстанції практично не підвищується.

Такий же ефект виходить, якщо поблизу підстанції розташована багатокілійна станція, тому що величина z_3 маленька.

У таблиці 1.6 наведені значення r_p , обчислені за формулами (1.17) – (1.18). Екрануюча дія рейок трохи погіршується з ростом провідності землі.

Таблиця 1.6

Провідність землі, См/м	Коефіцієнт екрануючої дії рейок r_p на ділянці		
	одноколіній	двоколіній	багатоколіній
$1 \cdot 10^{-3}$	0,40	0,28	0,22
$10 \cdot 10^{-3}$	0,45	0,33	0,25
$100 \cdot 10^{-3}$	0,52	0,39	0,28

Примітка – Вихідні дані рейки Р65; ширина зближення більше 20 м.

Зі сказаного вище випливає, що потрібне відповідне коректування рекомендацій діючих правил захисту [2].

1.1.4 Проводи контактної мережі

Для електричних залізниць в основному застосовують контактні проводи марки МФ (мідний, фасонний) із площею перерізу 150, 100 і 85 мм², перші і другі на головних коліях, а останні на станційних. На залізницях постійного струму в більшості випадків, за умовами струмозняття, підвішуються два контактних проводи. Іноді замість двох контактних проводів МФ – 100 вдається обійтися одним з перерізом 150 мм². Крім того, для збільшення площини контакту між проводом і струмоприймачем, а також для зменшення тиску вітру на провід випускаються проводи МФО – овальної форми (зі зменшеним розміром по вертикалі і збільшеним по горизонталі). У контактних підвісках застосовують також бронзові контактні проводи марки Б_рФ (зокрема міднокадмієві) підвищеної міцності, але меншої провідності, сталеалюмінієві і сталемідні.

На головних коліях ліній постійного струму найчастіше використовуються мідні несучі троси марок М – 120 і М – 95. На станційних коліях постійного струму застосовують біметалічні сталемідні троси марок ПБСМ1 і ПБСМ2 з перерізами 70 і 95 мм². З метою економії міді і на перегонах для несучих тросів застосовують біметалічні і сталеалюмінієві троси і проводи контактної підвіски.

У випадках, коли необхідна провідність, встановлена електричним розрахунком, перевищує провідність проводів,

включених в ланцюгову підвіску, вдаються до підвісу підсилюючих проводів. Матеріалом для підсилюючих проводів, як правило, на залізницях служить алюміній. У практиці електрифікованих залізниць, як підсилюючі проводи, найбільше застосування знайшли алюмінієві проводи марок А-150 і А-185. Останнім часом застосовують тільки А-185. При застосуванні подвійних ланцюгових підвісок як допоміжні троси можуть бути застосовані мідні, сталемідні і зношені контактні проводи.

На маневрових коліях, у тих випадках, коли небезпека корозії зменшена, наприклад, на коліях, де не використовуються паровози і лінія лежить далеко від моря (району посиленої корозії), застосовують як несучі – сталеві троси марки С перерізом 70 мм². Для живлення нетягових споживачів на опорах контактної мережі підвищують комбіновані сталеалюмінієві проводи марки АС, як правило, перерізом 35 мм².

Необхідні для розрахунків електричні характеристики використовуваних проводів наведені в таблиці 1.1 [2]. При розв'язанні ряду задач доводиться оперувати питомими опорами мідних і алюмінієвих проводів, а також співвідношенням цих опорів. Як бачимо з таблиці 1.1, питомий опір мідних і алюмінієвих проводів трохи вище аналогічних даних для чисто гальванічної міді й алюмінію. Виходячи з цифр, наведених у таблиці 1.1, можна прийняти питомий опір для міді ρ_m і алюмінію ρ_a і їхнє співвідношення рівними: $\rho_m=18,2$ Ом·мм²/км; $\rho_a=31,0$ Ом·мм²/км; $\rho_a/\rho_m=1,7$.

Опори контактних (і інших) проводів визначаються за відомою формулою

$$r_r = \frac{\rho}{S},$$

де r_r – опір проводу, Ом/км;

ρ – питомий опір, Ом·мм²/км;

S – площа поперечного перерізу, мм².

Якщо в контактній мережі паралельно мідним приєднані алюмінієві (посилуючі) проводи, то

$$r_k = \frac{\rho_m}{S'_m + \frac{S_a}{1.70}} = \frac{\rho_m}{S'_m},$$

де ρ_m – питомий опір, Ом·мм²/км;

S'_m – сумарна площа поперечного перерізу паралельно з'єднаних мідних проводів контактної мережі, мм²;

S_a – те ж алюмінієвих проводів;

S_m – сумарний переріз усіх проводів у мідному еквіваленті.

Наведені в таблиці 1.1 питомі опори проводів дані для $t=20^\circ\text{C}$. При іншій температурі питомий опір визначається за формулою

$$\rho_t = \rho_{20} + \alpha(t - 20),$$

де ρ_t – питомий опір при температурі t °C;

ρ_{20} – ті ж при $+20^\circ\text{C}$;

α – температурний коефіцієнт (для міді $\alpha_m=0,004$ і для алюмінію $\alpha_a=0,0040 \div 0,0043$).

1.1.5 Опір тягової мережі змінному струму

Це еквівалентний опір 1 км тягової мережі z_0 , Ом/км, що, будучи помноженим на струм у контактній мережі між підстанцією і навантаженням I_k , дає таке ж спадання напруги на 1 км тягової мережі, яке спостерігається в дійсності:

$$\Delta U = z_0 I_k. \quad (1.19)$$

Для найбільш важливих випадків цей опір може бути обчислений при використанні співвідношень, виведених Ф. Полячеком [2], на підставі яких можна обчислити так званий власний опір проводу довжиною 1 км z_{n-3} , Ом/км, що проходить над поверхнею землі, який має питомий опір ρ_3 , Ом·м. При виведенні співвідношень враховується, що в землі 2 (рисунок 1.4, а), як у масивному провіднику, під дією магнітного потоку Φ_{n-3} , створюваного струмом у проводі 1, наводяться вихрові струми 3, що своїм магнітним полем наводять ЕРС взаємоіндукції в проводі 1. Щільність вихрових струмів у землі нерівномірна. Найбільш висока вона на поверхні землі безпосередньо під проводом. В середині й в сторони від траси проводу щільність знижується. Для зручності урахування

вихрових струмів, сукупну дію на провід 1 можна звести до дії такого ж струму в деякому уявному проводі 4, що знаходиться від проводу 1 на відстані D (рисунок 1.4, б). Таким чином, обчислення опору проводу над землею зводиться до обчислення опору проводу двопровідної лінії зі зворотними напрямками струмів. Схема зміщення проводу, що проходить над землею, така ж, як для будь-якого елемента ланцюга (рисунок 1.4, в). Співвідношення Поллячека дають можливість визначити власні опори контактного проводу $z_{к-з}$ і рейки $z_{п-з}$. Множення цих опорів на струм у контактному проводі I_k і рейці I_p дозволяє знайти складові спадання напруги в проводі або рейці від власного струму.

Одночасно з цим співвідношення Поллячека дозволяє обчислити опір взаємоіндукції між двома проводами над землею, наприклад між контактним проводом і рейкою $z_{к-р}$. Помноживши цей опір на струм у контактному проводі I_k , знайдемо ЕРС взаємоіндукції, наведену в рейці струмом контактного проводу, і навпаки, помноживши на струм у рейках I_p , – ЕРС взаємоіндукції, наведену в контактному проводі струмом, що протікає в рейках.

Використання співвідношень Ф. Поллячека дозволяє нарисувати схему заміщення ділянки тягової мережі довжиною 1км (рисунок 1.5), де к, р і з – відповідно контактна мережа, рейка, земля.

Розглянемо обчислення опорів тягової мережі z_0 граничних випадків.

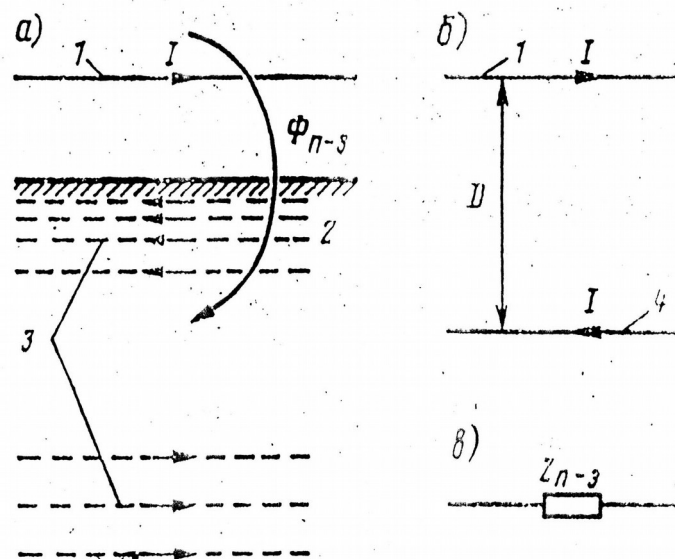


Рисунок 1.4 – Пояснювальна схема процесу протікання змінного струму в проводі над землею (а), еквівалентна їй розрахункова схема (б) і схема заміщення 1км проводу (в)

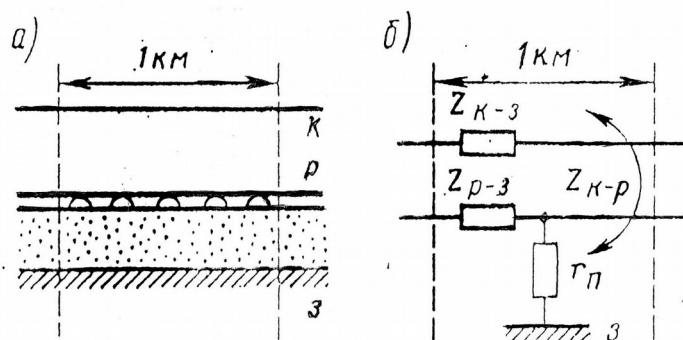


Рисунок 1.5 – Ділянка тягової мережі змінного струму довжиною 1км (а) і його схема заміщення (б)

Випадок 1 ($r_n = \infty$). Приблизно при розрахунках (рисунок 1.5) опір рейка – земля можна прийняти дуже великим за умови, що відстань l між потягом 3 і підстанцією 1 невелика, рейки 4 покладені на чисті шпали і баласт, ґрунт 5 сухий або промерзлий. Рейки виявляються ізольованими від землі, і весь струм повертається до підстанції по рейках, тобто $I_p = -I_k$.

Запишемо вираз для визначення спадання напруги на ділянці тягової мережі довжиною 1км. Для цього розглянемо схему заміщення (рисунок 1.5, б) по напрямку позитивного струму в тяговій мережі, тобто за годинниковою стрілкою. Це спадання напруги в контактному проводі $2\Delta U_k$ і $4\Delta U_p$. Спадання напруги в контактному проводі, що викликається струмом контактного проводу I_k у власному опорі $z_{\kappa-З}$, струмом рейки I_p і опором взаємоіндукції контактний провід – рейка $z_{\kappa-ρ}$, можна знайти за формулою

$$\Delta U_k = I_k z_{\kappa-З} - I_p z_{\kappa-ρ}.$$

Тут стоїть знак мінус, тому що напрямок струму в рейці протилежний напрямку струму в контактній мережі.

Аналогічне спадання напруги в рейці викликається струмом в рейці I_p у власному опорі рейки $z_{\kappa-ρ}$ і струмом контактного проводу I_k в опорі взаємоіндукції $z_{\kappa-ρ}$. Його можна записати так:

$$\Delta U_p = I_p z_{p-3} - I_k z_{k-p}.$$

Повний вираз для спадання напруги запишемо таким чином:

$$\Delta U = \Delta U_k + \Delta U_p = I_k z_{k-3} - I_p z_{k-p} + I_p z_{p-3} - I_k z_{k-p}. \quad (1.20)$$

Нагадаємо, що наша задача зводиться до визначення деякого еквівалентного опору z_0 , який, будучи помноженим на струм у контактній мережі I_k , дає таке спадання напруги на 1км тягової мережі ΔU , яке спостерігається в дійсності (1.12). Тому, прирівнявши формули (1.12) і (1.13), знайдемо

$$z_0 = (z_{k-3} - z_{k-p}) + (z_{p-3} - z_{k-p}) - \frac{I_p}{I_k}. \quad (1.21)$$

Як бачимо, в отриманий вираз входить відношення $\frac{I_p}{I_k}$. У нашому випадку $\frac{I_p}{I_k} = 1$, тому з формули (1.14) знайдемо

$$z_0 = z_{k-3} + z_{p-3} - 2z_{k-p}. \quad (1.22)$$

Випадок 2 ($r_n=0$). Приблизно при розрахунках опір рейка – земля можна прийняти рівним нулю за умови, що відстань l між потягом 3 і тяговою підстанцією 1 велика, шпали і баласт брудні, після дощу ґрунт 5 насичений вологою. У цьому випадку рейки 4 цілком шунтуються землею. Струм, стікаючи в землю під колесами потяга, повертається з землі безпосередньо в підстанції. Однак у рейках між потягом і підстанцією все-таки протікає струм I_p . Цей струм викликається ЕРС взаємоіндукції, що наводиться в рейці струмом контактного проводу I_k і дорівнює $I_k \cdot z_{k-p} \cdot l$, а створюваний нею струм I_p замикається через землю. Якщо вважати, що опір землі дорівнює нулю, тоді опір контуру струму I_p через землю дорівнює власному опору рейки $z_{p-3} \cdot l$ між потягом та підстанцією. З огляду на все сказане запишемо

$$I_p = \frac{I_k z_{k-p} l}{z_{p-3}} = I \frac{z_{k-p}}{z_{p-3}}. \quad (1.23)$$

Розглянувши схему заміщення 1км тягової мережі (рисунок 1.5) по напрямку позитивного струму в тяговій мережі, тобто за годинниковою стрілкою, одержимо вираз для спадання напруги такий же, як і для випадку 1 (див. формулу (1.6)). Прирівнявши вирази (1.6) і (1.17), одержимо вже відомий вираз (1.14).

Відношення струмів $\frac{I_P}{I_K}$ у виразі (1.9) легко обчислюється з формули (1.23) :

$$\frac{I_P}{I_K} = \frac{z_{K-P}}{z_{P-3}}.$$

Підставляючи його у вираз (1.14) і перетворюючи остаточно, одержуємо

$$z_0 = z_{k-3} - \frac{z_{k-p}^2}{z_{p-3}}. \quad (1.24)$$

Для практичних розрахунків використовуються значення z_0 , обчислені для найбільш часто застосовуваних наборів (формул) проводів контактної мережі при заданому типі рейок у варіантах для випадків 1 ($r_n = \infty$) і 2 ($r_n = 0$), а також середні значення між ними, що звичайно використовуються в практичних розрахунках (таблиці 1.1 і 1.8).

У таблиці 1.7 наведені значення опорів тягової мережі одноколіїних ділянок, а в таблиці 1.8 – одноколіїної колії двоколіїних ділянок при різних схемах живлення колій.

Зауважимо, що при знаходженні z_0 передбачалося, що у всіх проводах тягової мережі протікає синусоїдальний змінний струм з частотою 50 Гц.

Таблиця 1.7

Формула проводів контактної мережі і тип рейок одноколіїної ділянки	Опір тягової мережі z_0 , Ом/км	Еквівалентний приведенний опір тягової мережі z' , Ом/км
ПБСМ-95+МФ-100 Р65	0,238+j0,55	0,475

ПБСМ-95+МФ-100 Р65	0,238+j0,544	0,531
М-120+МФ-100 Р65	0,164+j0,480	0,423

Отже, отримані опори також справедливі тільки для такого струму. Зокрема їх можна використовувати для визначення струмів короткого замикання в тяговій мережі (практично синусоїдальні), але не можна для визначення спаду напруги в тяговій мережі від струмів потягів (несинусоїдальні).

Установимо причину несинусоїдальності струмів, витрачуваних електровозами. Для цього розглянемо принципову схему електровоза з випрямлячами і їх роботу (рисунок 1.6). Двигуни електровоза 3 працюють найбільш стійко й економічно при цілком згладженому струмі I_0 (рисунок 1.6, б). Для згладжування струму в ланцюг двигунів включений реактор 4. Ідеальне згладжування досягається при нескінченно великій індуктивності реактора. Форма струму в ланцюзі двигуна I_D визначає форму струму I_2 у вторинній обмотці трансформатора 1, а отже, і первинного струму I_1 . Суцільними стрілками показані позитивні напівперіоди струмів I_2, I_1 , що протікають у позитивні напівперіоди живильної напруги U_2 . При ідеальному згладжуванні і відсутності індуктивностей у ланцюзі живлення випрямляча комутація відбувається миттєво і струм у тяговій мережі I_1 має прямокутну форму.

Таблиця 1.8

Формула проводів контактної мережі і тип рейок двоколіїної ділянки	Схема живлення колій двоколіїної ділянки	Опір тягової мережі (однієї колії) z_0 , Ом/км	Еквівалентний приведений опір тягової мережі (однієї колії) z' , Ом/км
ПБСМ1-95+МФ-100 Р65	Роздільна, друга колія відключена	0,204+j0,437	0,411
	Рівнобіжна, обидві колії включені	0,248+j0,600	0,548
ПБСМ2-70+МФ-100 Р50	Роздільна, друга колія відключена	0,240+j0,476	0,456

	Рівнобіжна, обидві колії включені	$0,294+j0,650$	0,606
М-120+МФ-100 Р65	Роздільна, друга колія відключена	$0,130+j0,414$	0,359
	Рівнобіжна, обидві колії включені	$0,176+j0,578$	0,498

Насправді індуктивність реактора хоч і велика, але не скінчена, тому згладжування струму неідеальне. Разом з тим тягова мережа і трансформатор електровоза мають індуктивність, тому випрямляч працює з кутом комутації $\psi > 0$ (рисунок 1.6, в). Усе разом узяте приводить до того, що форма струму I_1 у тяговій мережі відрізняється від прямокутної і є істотно несинусоїдальною.

З електротехніки відомо, що несинусоїдальний періодичний струм можна представити як суму синусоїдальних періодичних струмів: струму основної частоти 50 Гц і струмів з частотами, кратними основній. У нашому випадку це будуть струми з частотами 150, 250, 350 Гц і т.д.

Для струму кожної частоти опір буде свій, тому що і активний і індуктивний опори тягової мережі залежать від частоти. Тому для практичних розрахунків падіння напруг у тяговій мережі від підстанції до потяга ввели поняття приведенного опору тягової мережі z' .

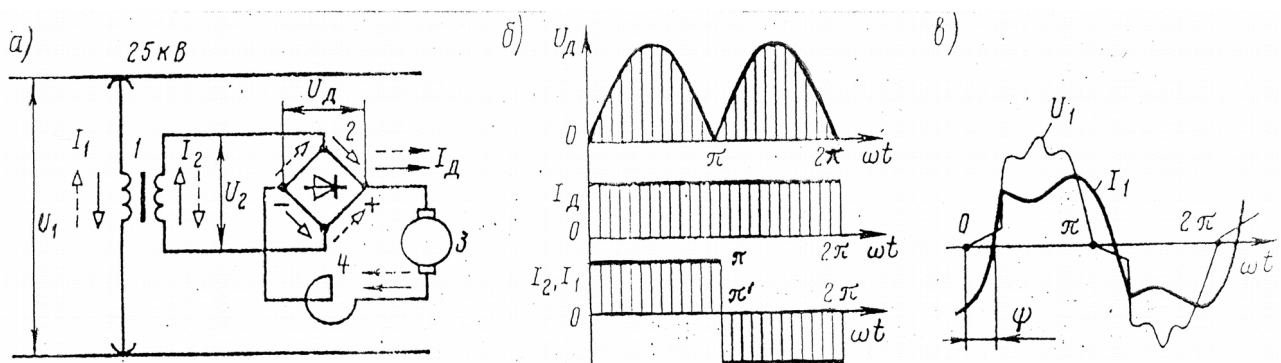


Рисунок 1.6 – Принципова схема електровоза змінного струму з випрямлячами (а), криві струмів і напруг при ідеальному згладжуванні струму двигуна і відсутності індуктивності в

ланцюзі живлення випрямляча (б) і реальні криві первинного струму електровоза і напруги в тяговій мережі

Втрата напруги на деякій ділянці тягової мережі довжиною l визначається виразом $\Delta u' = z' I_d$.

Приведений випрямлений струм:

$$I'_d = I_d / K_{T1}, \quad (1.25)$$

де K_{T1} - коефіцієнт трансформації трансформатора електровоза.

Для визначення z' у ВПІЗТі виконані великі експериментальні дослідження на діючих електрифікованих лініях змінного струму. Результати експериментів удалося узагальнити у вигляді емпіричної формули $z' = 0.47r + 0.72x$, де r і x – відповідно активний та індуктивний опори тягової мережі (див. таблиці 1.7 та 1.8).

1.2 Попереднє завдання

1.2.1 Вивчити розподіл потенціалів і струмів у рейках, контактних провідниках і навантаженні.

1.2.2 Накреслити дослідну схему (рисунок 1.7).

1.2.3 Накреслити таблицю 1.9 розрахункових досліджень.

1.2.4 Підрахувати еквівалентні опори рейок, контактного проводу та навантаження згідно зі схемою (рисунок 1.1).

1.2.5 Результати розрахунків занести до таблиці 1.10.

1.2.6 Згідно з визначеними I_p , I_k , I_n та U_p , U_k , U_n побудувати епюри.

1.3 Робоче завдання

1.3.1 Виконати вимірювання напруги і струмів при навантаженнях R_{H1} , R_{H2} , R_{H3} .

1.3.2 Визначити екрануючу дію рейок.

1.4 Виконання робочого завдання

УВАГА! На лабораторному стенді діє висока напруга $U=220$ В. Усі перемикання на лабораторному стенді виконувати з відключеною напругою.

Подавати напругу на стенд тільки з дозволу викладача.

1.4.1 Перший дослід

Між гніздами XS 1 і XS 2 вольтметром виміряти напругу, потім вимикач SW 1 поставити в положення «ВКЛ» і з'єднати гнізда XS 6, XS 7 і XS 32 з XS 33 і між гніздами XS 2 та XS 3 виміряти амперметром струм.

Після з'єднання гнізд XS 2 з XS 3 виміряти напругу між гніздами XS 2, XS 4, XS 5, XS 6, XS 29, XS 30, XS 31.

Всі виміряні дані занести в таблицю 1.9.

1.4.2 Другий дослід

Після з'єднання гнізда XS 8 з XS 9, а XS 35 з XS 36, вимикач SW 2 поставити в положення «ВКЛ», виміряти напругу між гніздами згідно з пунктом 1.4.1 та між XS 2, XS 8, XS 3. Амперметром по черзі виміряти струм між XS 8, XS 9 і XS 32 та XS 35, XS 36. Всі вимірювання занести в таблицю 1.9.

1.4.3 Третій дослід

Після з'єднання гнізда XS 10 з XS 11, а XS 12 з XS 13, XS 39 з XS 40, вимикач SW 3 поставити в положення «ВКЛ». Виміряти напругу між гніздами згідно з пунктами 1.4.1, 1.4.2 та між XS 2, XS 12, XS 40.

Потім по черзі між гніздами XS 6 та XS 7, XS 32 та XS 33, XS 8 та XS 9, XS 12 та XS 13, XS 35 та XS 36, XS 39 та XS 40 амперметром виміряти струми.

Всі вимірювання занести в таблицю 1.9.

1.5 Обробка результатів досліджень

1.5.1 Графічна робота:

- накреслити схему (рисунок 1.7) та епюри розподілу струмів (аналогічно рисунку 1.10);
- накреслити залежність $R_c = f(L)$;

- порівняти зроблені креслення з наведеними в розділі 1.1.3.

1.5.2 Розрахункова робота:

- згідно з формулами (1.16) – (1.18) зробити розрахунки r_p і порівняти з даними в розділі 1.1.3 і таблицею 1.10.

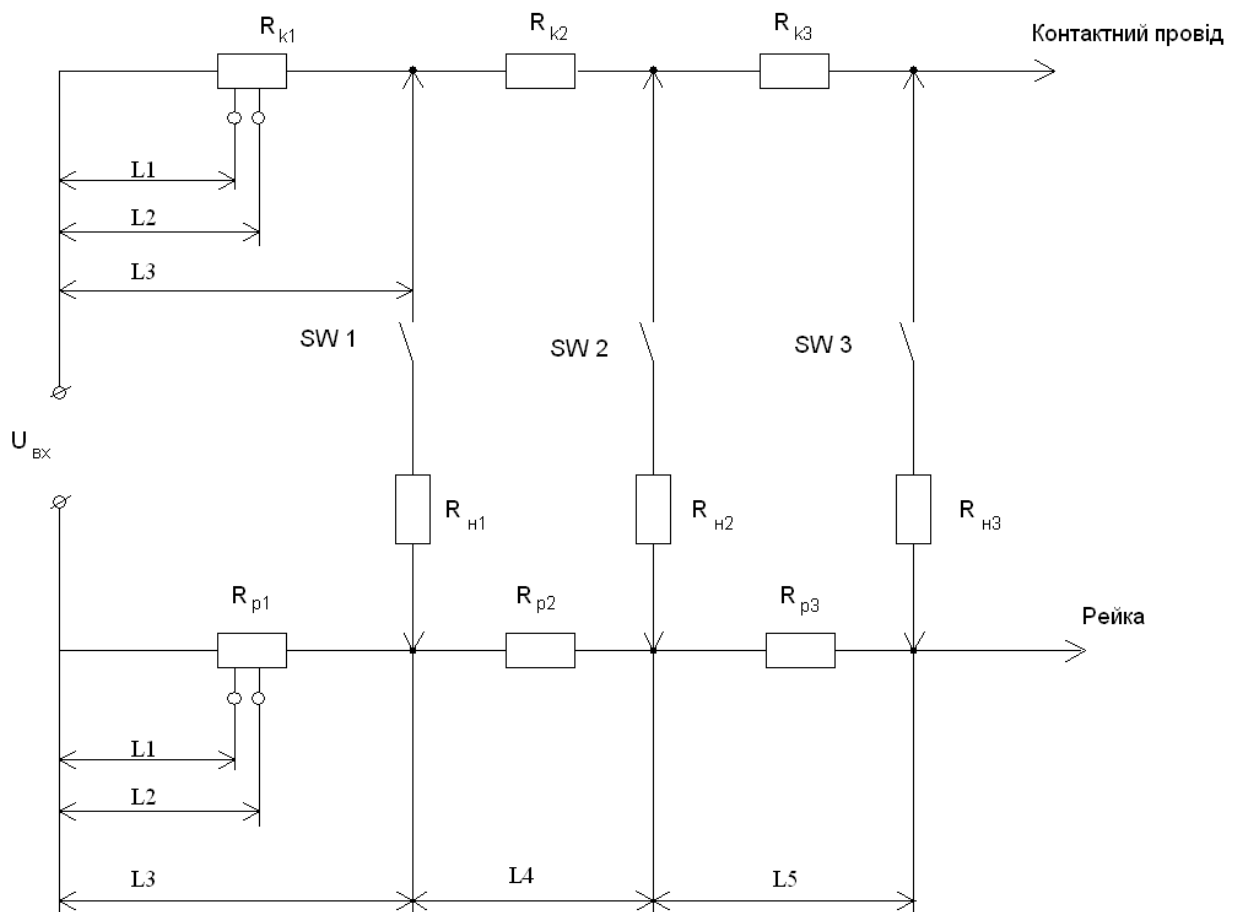


Рисунок 1.7 – Еквівалентна схема екрануючої дії рейок

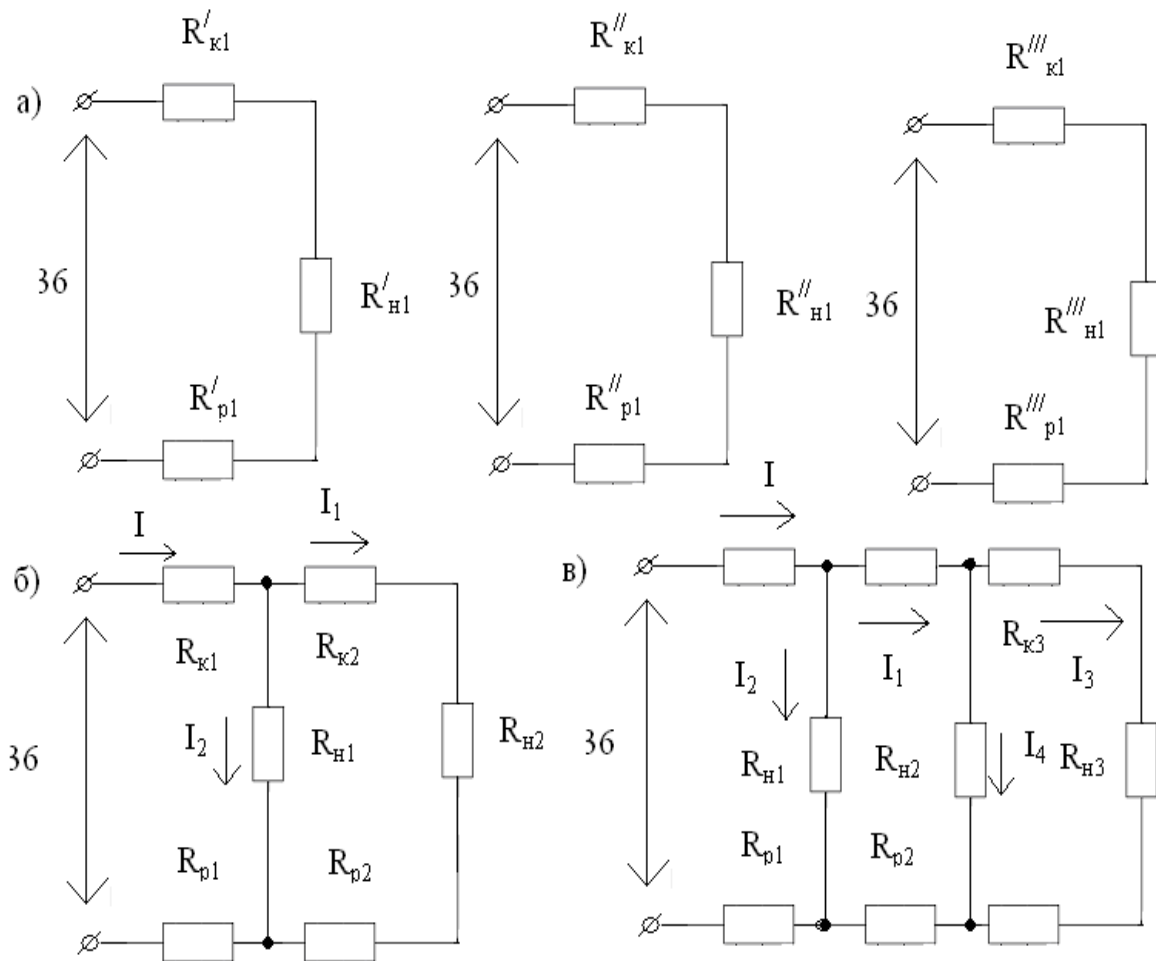
$$L1=L2=L3=1 \text{ км}; L4=L5=5 \text{ км}$$

Розрахунок екрануючої дії рейок

Вихідні дані:

напряга $U_{\text{вх}}=36 \text{ В}$; рейки Р65 $R_p=1,5 \text{ Ом/км}$; провід МФ 100 $R_k=1,77 \text{ Ом/км}$; навантаження $R_H=1,83 \text{ Ом}$.

Розрахункові еквівалентні схеми наведено на рисунку 1.8.



а) $L=(1 \div 3)\text{км}$; б) $L= 8\text{км}$; в) $L= 13\text{км}$

Рисунок 1.8 – Розрахункові еквівалентні схеми

Таблиця 1.9 — Результати дослідів

Величина	Результати дослідів				
	$L_1=1\text{км}$	$L_2=2\text{км}$	$L_3=3\text{км}$	$L_4=8\text{км}$	$L_5=13\text{км}$
Падіння напруги в контактній мережі, В					
Падіння напруги в рейках, В					
Падіння напруги на навантаженні, В					
Струми в ланцюгах, А					

Екрануюча дія рейок на відстані навантаження від підстанції $R_{екр}$, Ом					
----------------------------------------------------------------------------	--	--	--	--	--

Таблиця 1.10 — Результати розрахунку

Величина	Результати розрахунків				
	$L_1=1\text{км}$	$L_2=2\text{км}$	$L_3=3\text{км}$	$L_4=8\text{км}$	$L_5=13\text{км}$
Падіння напруги в контактній мережі, В	12,49	15,23	16,42	16,662	16,662
	—	—	—	2,539	25,213
	—	—	—	—	0,23
Падіння напруги в рейках, В	10,59	12,9	13,92	14,121	14,12
	—	—	—	2,152	1,3
	—	—	—	—	0,117
Падіння напруги на навантаженні, В	12,92	7,87	5,66	5,217	5,217
	—	—	—	0,525	0,481
	—	—	—	—	0,048
Струми в ланцюгах, А	7,059	—	—	3,138	3,138
	—	4,3	—	0,287	0,289
	—	—	3,093	2,851	2,849
	—	—	—	—	0,026
	—	—	—	—	0,263

Екрануюча дія рейок на відстані навантаження від підстанції $R_{екр}$, Ом	0,584	0,44	0,39	0,344	0,258
----------------------------------------------------------------------------	-------	------	------	-------	-------

З графіка (рисунок 1.9) видно, що чим ближче навантаження (ЕРС) знаходиться до підстанції, тим екрануюча дія рейок більша.

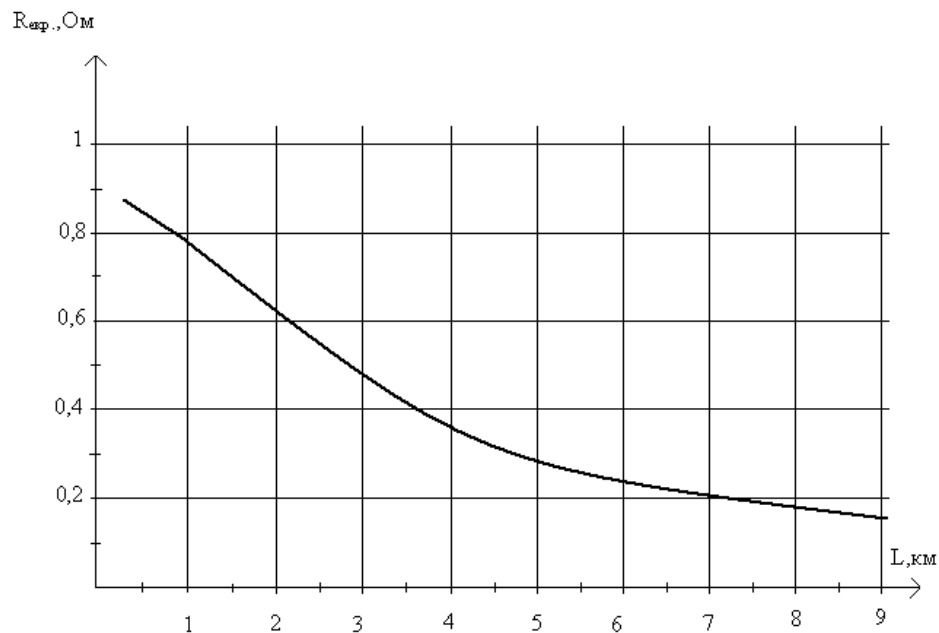


Рисунок 1.9 – Графік залежності екрануючої дії рейок від відстані між навантаженням та тяговою підстанцією $R_{екр.} = f(L)$

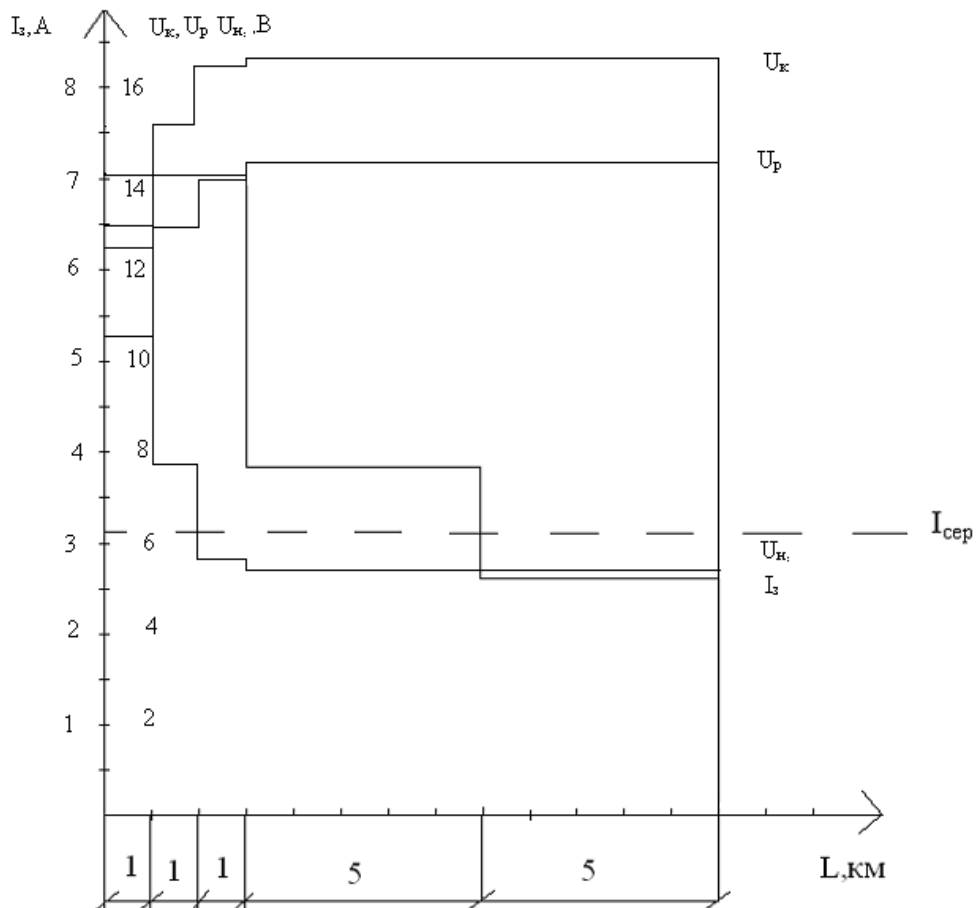


Рисунок 1.10 – Епюра розподілення струму навантаження уздовж фідерної зони
Лабораторна робота 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКРАНУЮЧОЇ ДІЇ ВІДСМОКТУВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

2.1 Захисна (екрануюча) дія відсмоктувальних трансформаторів

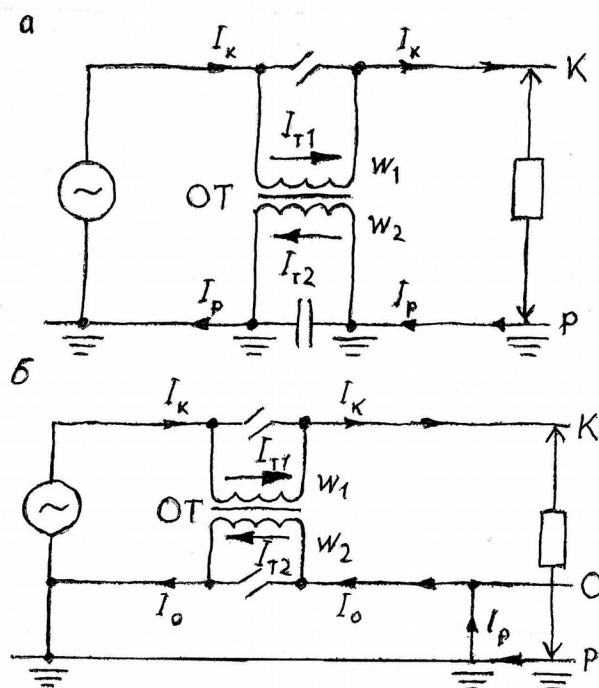
Рейки можна розглядати як екрануючий провід, що знижує магнітний вплив контактної мережі на суміжні лінії при середніх умовах приблизно у 2 рази. Результуючий вплив на прилеглі лінії залишається ще досить великим. Для його зниження треба зменшити коефіцієнт екранування рейок S_p . З формули (2.1) ясно, що для зменшення коефіцієнта екранування треба або зменшити опір рейок z_p , що практично важко зробити, або збільшити взаємний опір $z_{кр}$, а отже, коефіцієнт взаєміндукції

$M_{кр}$ між контактною мережею і рейками. Це приведе до збільшення струму в рейках і підвищення їхньої екрануючої дії.

$$r_p = I - z_{kp} / z_p. \quad (2.1)$$

Такого ефекту можна домогтися на залізницях змінного струму застосуванням відсмоктувальних трансформаторів.

Відомі дві схеми вмикання відсмоктувальних трансформаторів (рисунок 2.1). Первинна обмотка відсмоктувального трансформатора в обох схемах вмикається в розтин контактної мережі К. Вторинна обмотка ВТ у першій схемі вмикається в розтин рейок (рисунок 2.1, а). В другій схемі вторинна обмотка ВТ вмикається в розтин додаткового, так званого зворотного проводу \emptyset , який між трансформаторами і у підстанції з'єднується перемичками з рейками (рисунок 2.1, б).



а – вторинна обмотка ВТ увімкнена в рейки (Р); б – вторинна обмотка ВТ увімкнена в зворотний провід (\emptyset); w_1, w_2, I_{T1}, I_{T2} – число витків і струми первинної і вторинної обмоток ВТ; I_k, I_p, I_o – струми в контактній мережі, рейках і зворотному проводі
Рисунок 2.1 – Принципові схеми вмикання відсмоктувальних трансформаторів (ВТ)

Навантажувальний ланцюг вторинної обмотки

відсмоктувального трансформатора в першій схемі складають рейки, земля і перехідний опір між ними, а в другій схемі також і зворотний провід. Величина навантажувального опору залежить від ряду факторів: параметрів системи “рейки – земля”, відстані між відсмоктувальними трансформаторами опору взаємоіндукції між проводами і рейками, співвідношення струмів у них, а також від розташування електровоза в зоні трансформаторів. У першій схемі величина цього опору може складати частки ома, у другій $1 \div 3 \text{ Ом}$ [2].

Таким чином, відсмоктувальний трансформатор являє собою силовий трансформатор з малим навантажувальним опором, тобто за режимом роботи близький до трансформатора струму. Коефіцієнт трансформації його звичайно дорівнює або близький до одиниці.

Для з'ясування принципу роботи відсмоктувального трансформатора розглянемо його векторну діаграму (рисунок 2.2), прийнявши коефіцієнт трансформації рівним одиниці. Струм, що протікає в первинній обмотці, I_{T1} (струм контактної мережі) створює в сердечнику магнітний потік Φ . Цей потік викликає в обох обмотках ω_1 і ω_2 ЕРС, що відстають від нього на 90° . Векторна сума падінь напруги $I_{T2}r_{T2}$ і $I_{T2}x_{T2}$ являє собою напругу на затискачах вторинної обмотки трансформатора U_2 , що випереджає струм I_{T2} на кут β . Додавши до цієї напруги векторну суму активної ($I_{T2}r_{T2}$) і реактивної ($I_{T2}x_{T2}$) складових спадання напруги у вторинній обмотці, що має опір $z_{T2}=r_{T2}+jx_{T2}$, одержимо вектор ЕРС у вторинній обмотці E_2 .

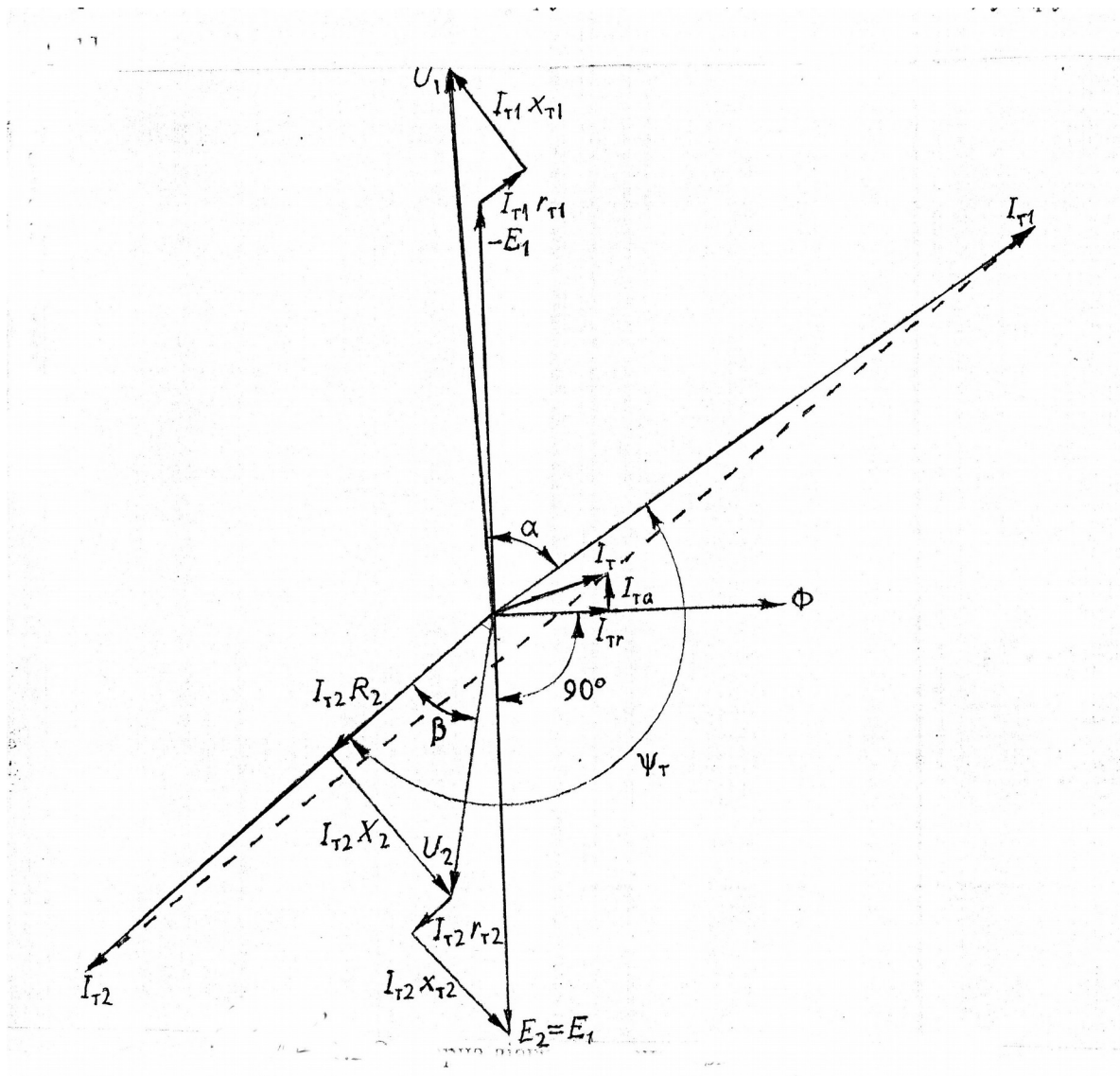


Рисунок 2.2 – Векторна діаграма відсмоктувального трансформатора

ЕРС E_2 індукується магнітним потоком Φ і відстає від нього на 90° . Для створення потоку необхідний струм намагнічування I_T . Його реактивна складова I_{Tr} збігається по фазі з потоком, а активна складова I_{Ta} , що залежить від втрат у сталі, випереджає потік на 90° . Якби струм намагнічування прагнув до 0 (в ідеальному трансформаторі), то векторна сума первинного і вторинного струмів дорівнювала 0. Насправді маємо таке співвідношення: $I_{T1} + I_{T2} = I_T$, тоді вектор первинного струму може бути побудований, виходячи з формули $I_{T1} = -I_{T2} + I_T$. Таким чином, через струм намагнічування струм вторинної обмотки зсунутий по фазі від струму первинної обмотки на кут $\psi_T < 180$ і трохи менше нього по величині.

ЕРС E_1 є протиелектрорушійною силою. Відкладемо вектор $-E_1$ і додамо до нього векторну суму активної складової спадання напруги $I_{T1}r_{T1}$ у первинній обмотці ω_1 , що має опір $z_{T1} = r_{T1} + jx_{T1}$ (ця складова збігається по фазі зі струмом I_{T1}), і реактивної складової спадання напруги $I_{T1}x_{T1}$, що випереджає струм I_{T1} на 90° . У результаті отримуємо вектор напруги на затискачах первинної обмотки трансформатора U_1 , який випереджає вектор первинного струму I_{T1} на кут α .

Практично на фідерній зоні в тягову мережу вмикаються декілька відсмоктувальних трансформаторів з інтервалом між ними l_0 , як показано на рисунку 2.3, а для першої схеми їх вмикання.

Якщо на розглянутій ділянці один електровоз, то в контактній мережі між підстанцією та електровозом протікає в даний момент незмінний по її довжині струм I_K (рисунок 2.3, б). При відсутності відсмоктувальних трансформаторів струм у рейках розподіляється у відповідності до штрихової лінії 1 на рисунку 2.3, в. Від електровоза струм у рейках розтікається по обидва боки, причому праворуч від нього на деякій відстані цілком стікає в землю, а ліворуч від підстанції струм протікає з землі в рейки. Між підстанцією та електровозом тільки частина струму протікає в рейках, тому що рейки зашунтовані землею. Цим і визначається порівняно слабка екрануюча дія струму рейок на суміжні лінії.

При наявності відсмоктувальних трансформаторів струм у рейках у місцях їх вмикання дорівнює струму вторинної обмотки $I_p = I_{T2} \approx -I_K$, а праворуч від електровоза і ліворуч від підстанції струм у рейках зменшується.

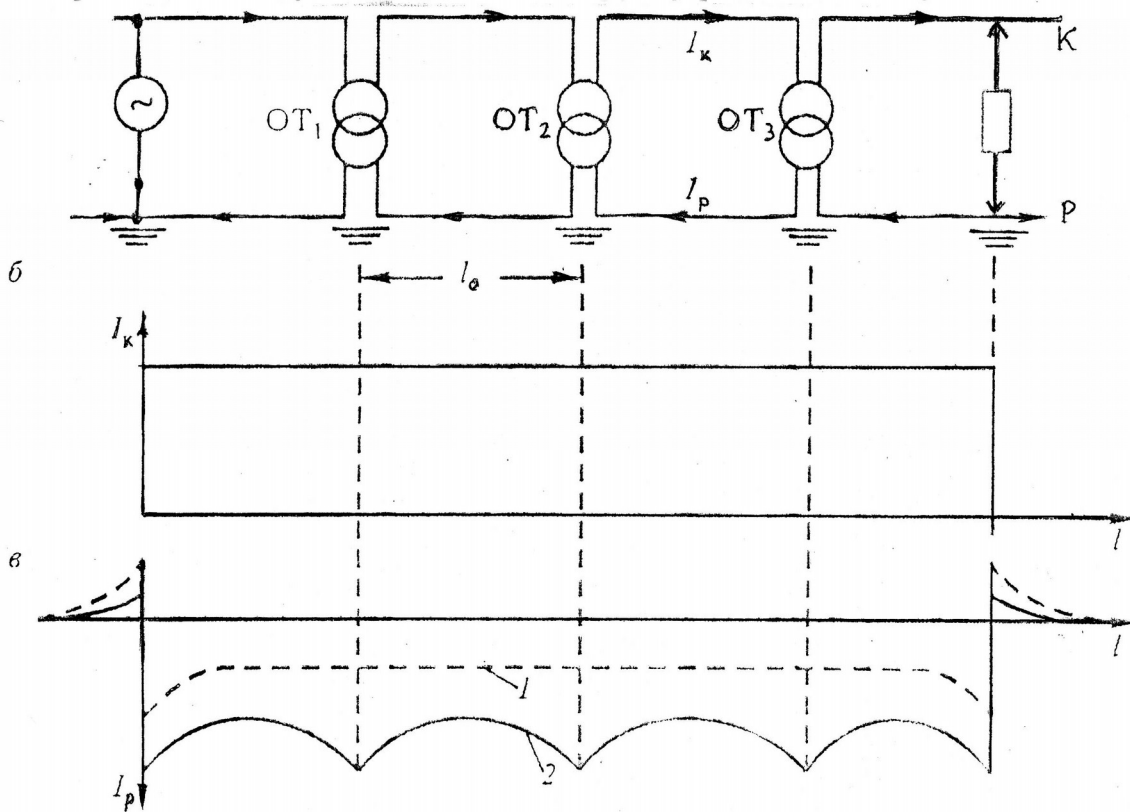


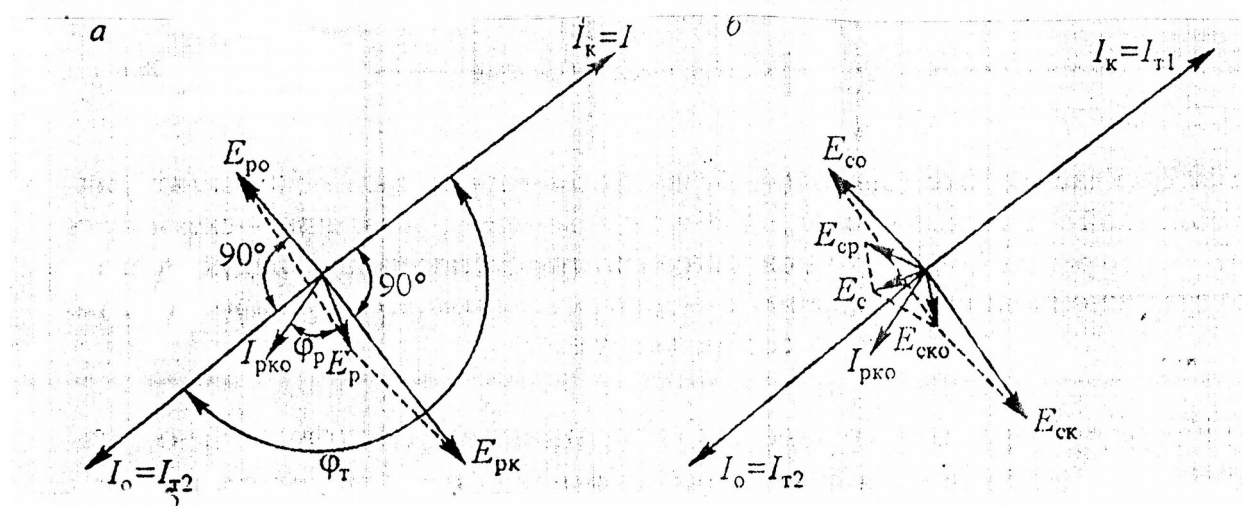
Рисунок 2.3 – Ділянка з відсмоктувальними трансформаторами, увімкненими вторинною обмоткою у рейки і з одним електровозом

Розподіл струму у рейках для цього випадку показано суцільною лінією 2 на рисунку 2.3, в. Оскільки струм у рейках при цьому більше, ніж без трансформаторів, то і його екрануюча дія виявляється сильніше. Таким чином, трансформатори відсмоктують струм із землі в рейки, тому вони й одержали назву відсмоктувальних.

Однак в інтервалах між трансформаторами є витік струму в землю, що веде до зниження екрануючої дії. Величина струму витіку залежить від відстані між трансформаторами l_0 і перехідної провідності “рейки – земля”. Відсмоктувальні трансформатори доцільно вмикати в тягову мережу в місцях сполучення анкерних ділянок, де можна секціонувати контактну мережу, зробивши сполучення ізолюючим. Тому інтервал l_0 може бути рівним довжині анкерної ділянки, що складає звичайно близько 1,5 км. При відсмоктувальних трансформаторах з увімкненою в рейки вторинною обмоткою і $l_0=1,5$ км

екрануюча дія висока, але потрібно занадто багато трансформаторів, які збільшують вартість тягової мережі. При $l_0 = 4,5 \dots 6$ км екрануюча дія сильно послаблюється. При $l_0 = 3$ км вплив тягової мережі з трансформаторами, як показують розрахунки, у 2-5 разів менше, ніж від тягової мережі без трансформаторів (при різній перехідній провідності).

З рисунка 2.4, б видно, що струми I_k , I_o , I_{pko} індукують у суміжній лінії результуючу ЕРС $E_{ск}$, E_{co} і E_{cp} , що складаючись, утворюють у суміжній лінії ЕРС $E_c = E_{cl}$. Ця ЕРС є частиною індукуючої у суміжній лінії повної ЕРС. Вона не залежить від інтервалу між відсмоктувальними трансформаторами і називається транзитною складовою [4].



а – діаграма для визначення індукованого в рейках струму I_{pko} ;
б – діаграма для визначення результуючої ЕРС у суміжній лінії E_c

Рисунок 2.4 – Векторні діаграми впливу тягової мережі з відсмоктувальним і зворотним проводами на суміжну лінію

2.2 Попереднє завдання

2.2.1 Вивчити побудову, схему вмикання відсмоктувальних трансформаторів та захисну (екрануючу) їх дію в мережах електропостачання змінного струму 27,5 кВ.

2.2.2 Накреслити дослідну схему згідно з рисунком 2.1.

2.2.3 Розрахункові дані взяти з таблиці 1.4 лабораторної роботи 1, згідно з визначенням $I_{до}$, I_P , U_K , U_P .

2.2.4 Накреслити таблицю 1.9 розрахункових і експериментальних досліджень.

2.3 Робоче завдання

2.3.1 Виконати вимірювання напруги і струмів при навантаженнях R_{H1} , R_{H2} , R_{H3} .

2.3.2 Визначити екрануючу дію ВТ 1, ВТ 2 і ВТ 3 (без зворотного проводу).

2.4 Виконання робочого завдання

УВАГА! На лабораторному стенді діє висока напруга 220 В. Усі перемикач на лабораторному стенді виконувати з вимкненою напругою. Подавати напругу на стенд тільки з дозволу викладача.

2.4.1 Перший дослід

З'єднати гнізда XS 17 з XS 33, XS 16 з XS 32, потім увімкнути вимикач SW 1.

Вимірювання напруги і струмів провести між гніздами аналогічно лабораторній роботі 1, занести їх в таблицю 2.1.

Приклад результатів розрахунків подано в таблиці 2.2.

2.4.2 Другий дослід

З'єднати гнізда XS 18 з XS 32, XS 19 з XS 32 та увімкнути вимикач SW 2.

Вимірювання напруги і струмів провести між гніздами аналогічно з експериментом лабораторної роботи 1.

2.4.3 Третій дослід

З'єднати гнізда XS 20 з XS 35, XS 21 з XS 36, XS 24 з XS 39, XS 25 з XS 40, XS 2 з XS 13 потім увімкнути вимикач SW 3.

Вимірювання напруги і струмів провести між гніздами аналогічно з третім експериментом лабораторної роботи 1.

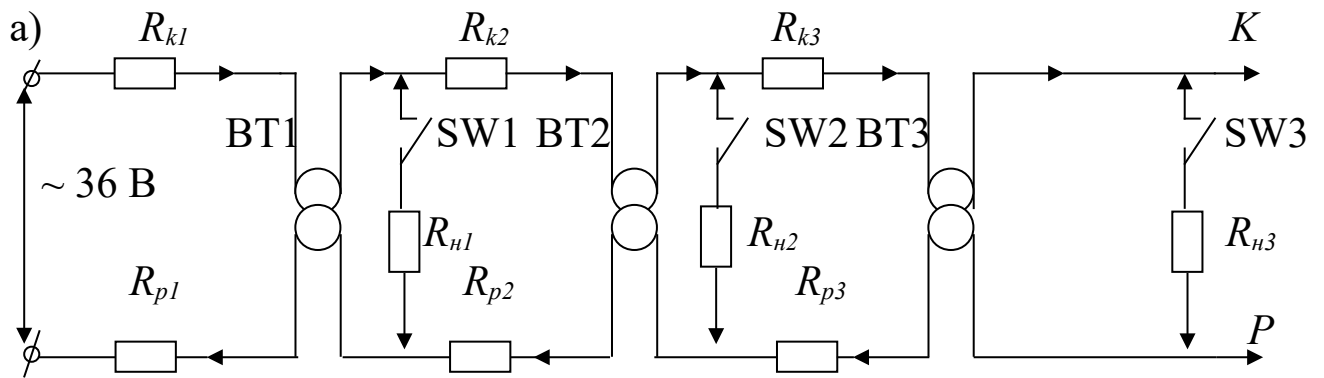
2.5 Обробка результатів досліджень

2.5.1 Графічна робота:

- намалювати схему (рисунок 2.5);
- намалювати епюри розподілу струмів (аналогічно з рисунком 2.3 теоретичної частини);
- намалювати залежність $R_c = f(I)$ і порівняти з даними, наведеними в теоретичній частині.

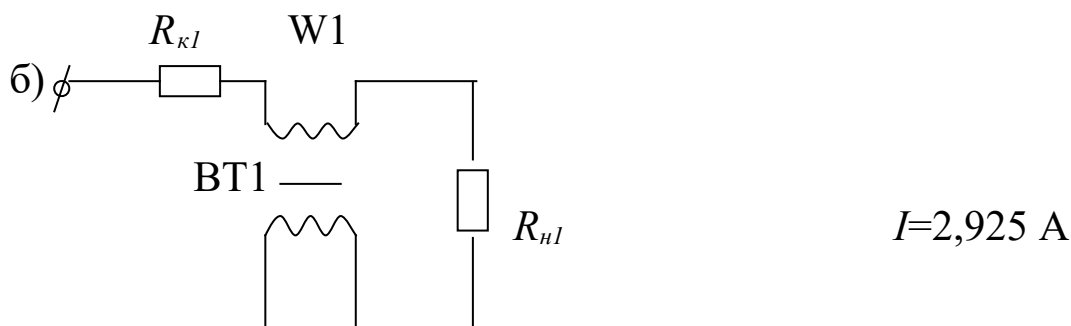
2.5.2 Розрахункова робота:

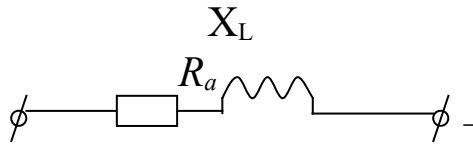
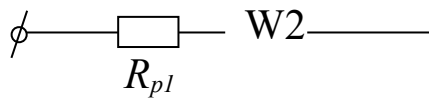
- згідно з формулою 1.18 розділу 1.1.3 зробити розрахунок $R_c = f(I)$ і порівняти з наведеними в теоретичній частині.



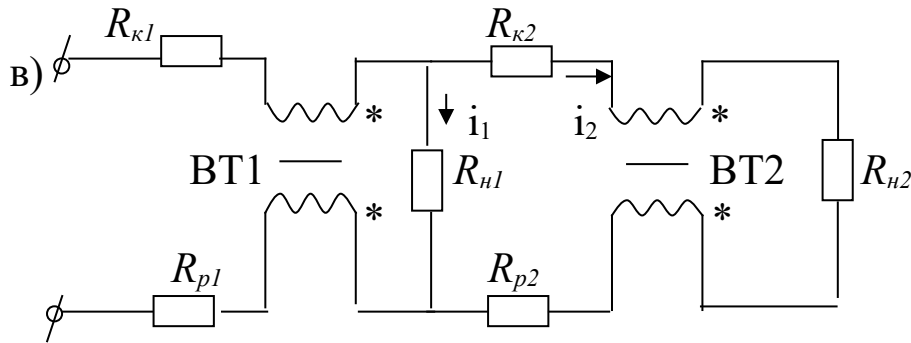
K – контактний провід; P – рейка

Рисунок 2.5, аркуш 1 – Розрахункові еквівалентні схеми

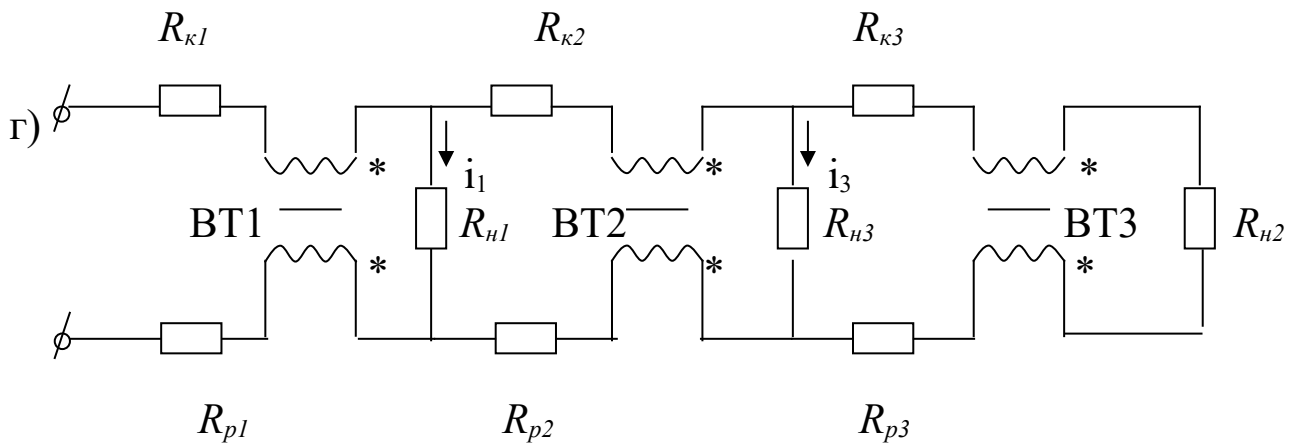




– Схема заміщення відсмоктувального трансформатора ВТ1



$I=2,069 \text{ A}$
 $I_I=1,875 \text{ A}$
 $I_2=0,194 \text{ A}$



$I=2,3 \text{ A}$

$I_I=1,93 \text{ A}$

$I_2=0,22 \text{ A}$

$I_3=0,2 \text{ A}$

а – еквівалентна схема з відсмоктувальним трансформатором;

б – $L_1=(1-3)\text{км}$; в – $L_2=8 \text{ км}$; г – $L_3=13 \text{ км}$

Рисунок 2.5, аркуш 2

Таблиця 2.1 – Результати дослідів

Величина	Результати дослідів		
	$L_1=3 \text{ км}$;	$L_2=8 \text{ км}$	$L_3=13 \text{ км}$
Падіння напруги в контактній мережі, В			
Падіння напруги на			

навантаженні, В			
Падіння напруги у відсмоктувальних трансформаторах, В			
Напруга на перемичці, В			
Струм в ланцюгах, А	I		
	I_1		
	I_2		
	I_3		
Екрануюча дія відсмоктувальних трансформаторів R_c , Ом			

Таблиця 2.2 – Результати розрахунків

Величина	Результати розрахунків		
	$L_1=3$ км	$L_2=8$ км	$L_3=13$ км
Падіння напруги в контактній мережі, В	15,53	10,89	12,26
		1,71	1,947
			1,947
Падіння напруги на	8,775	6,207	6,93

навантаженні, В		0,87	0,996
			0,09
Падіння напруги у відсмоктувальних трансформаторах, В	5,35	3,43	3,53
		0,35	0,366
			0,036
Напруга на перемичці, В	6,23	2,14	2,4
Струм у ланцюгах, А	I	2,925	2,95
	I_1		1,875
	I_2		0,194
	I_3		0,2
Екрануюча дія відсмоктувальних трансформаторів R_c , Ом	0,606	0,485	0,4

Графік екрануючої дії відсмоктувальних трансформаторів подано на рисунку 2.6.

Залежність падіння напруги в рейках від відстані до тягової підстанції з трьома локомотивами наведено на рисунку 2.7.

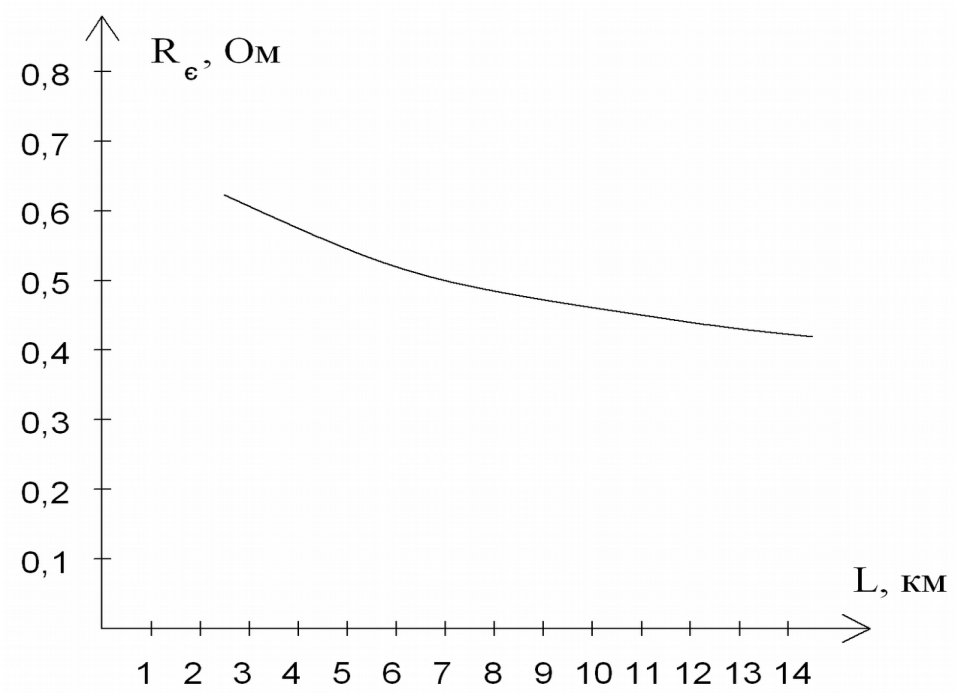


Рисунок 2.6 – Графік екрануючої дії відсмоктувальних трансформаторів

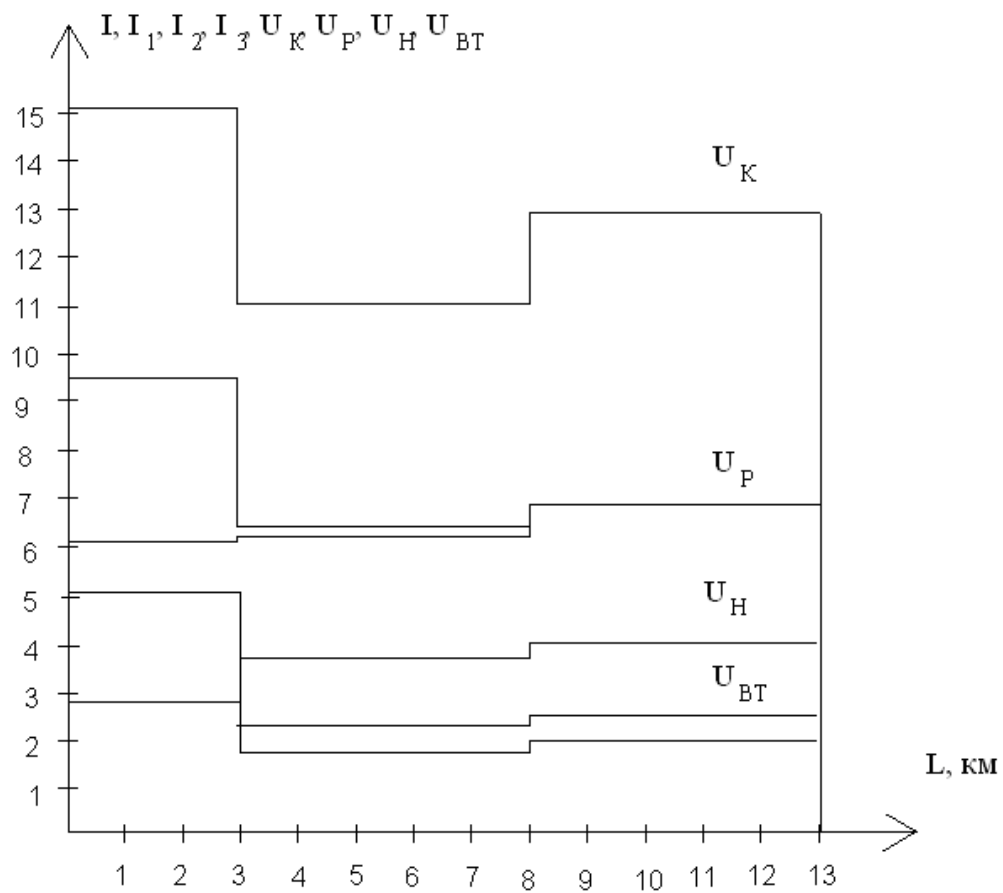


Рисунок 2.7 – Залежність падіння напруги в рейках від відстані до тягової підстанції з трьома локомотивами

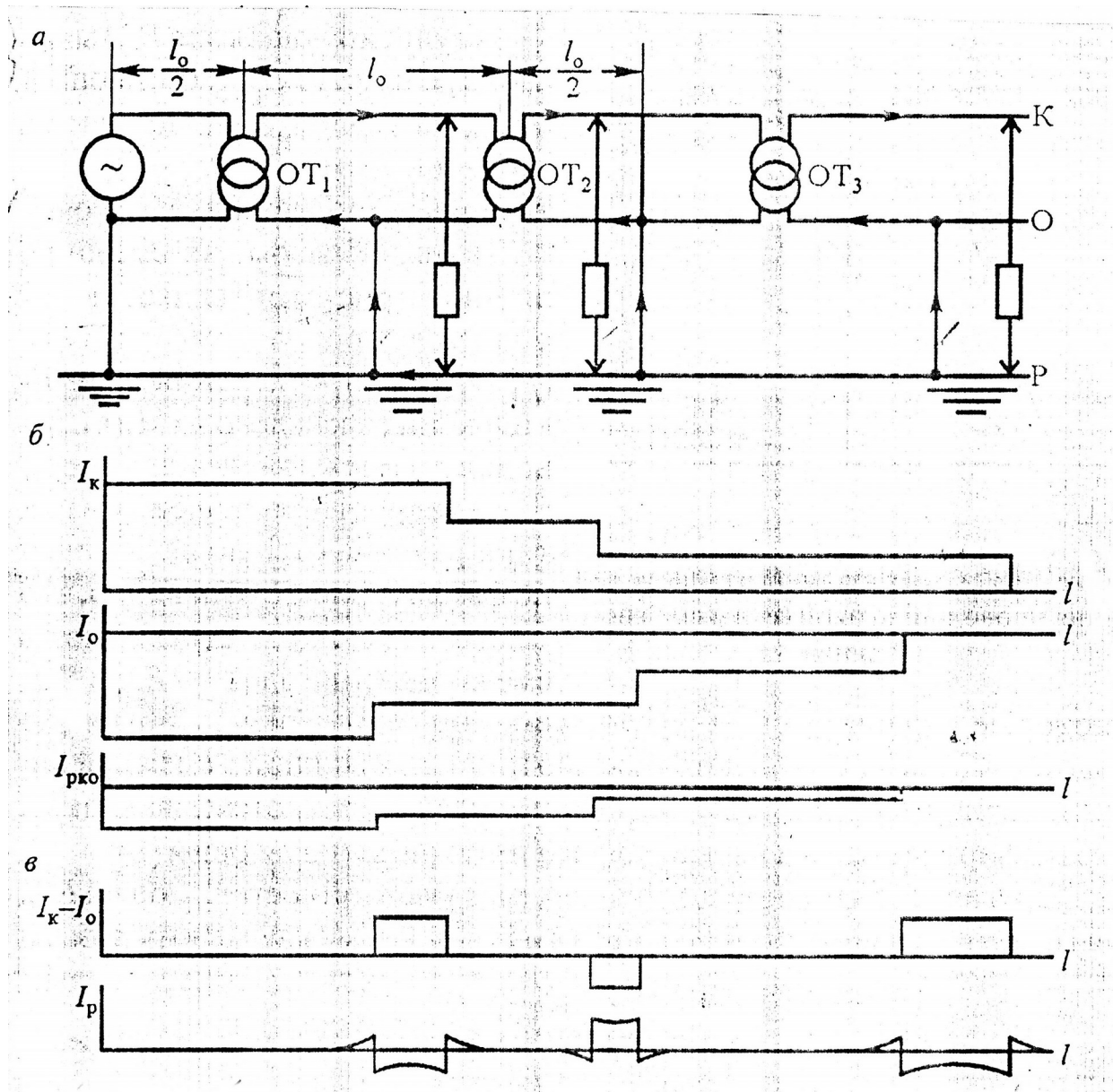
Лабораторна робота 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКРАНУЮЧОЇ ДІЇ ВІДСМОКТУВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ ІЗ ЗВОРОТНИМ ПРОВОДОМ

3.1 Захисна (екрануюча) дія відсмоктувальних трансформаторів із зворотним проводом

Значно кращий ефект спостерігається при другій схемі вмикання відсмоктувальних трансформаторів, коли вторинна обмотка увімкнена у зворотний провід. На рисунку 3.1, а подана така схема з декількома електровозами. Тут споживаний електровозами струм протікає по рейках (з частковим витокком в землю) тільки на коротких ділянках до найближчої перемички, через яку надходить у зворотний провід. На рисунку 3.1, б показана діаграма розподілу струму в контактній мережі I_K , обумовлена розташуванням електровозів, і діаграма струму у зворотному проводі I_o , обумовлена розташуванням перемичок. Струм I_o на ділянці між двома сусідніми перемичками дорівнює струму вторинної обмотки розташованого між ними трансформатора, тобто $I_{oi}=I_{T2i}$.

Тут же показана діаграма струму в рейках I_{pko} , індукованого струмами контактної мережі і зворотного проводу. Як видно з рисунка 3.2, відстань від рейок Р до еквівалентного проводу контактної мережі К, розташованого між несучим тросом НТ і контактним проводом КП, і до зворотного проводу О неоднакова; отже, різні й опори взаємоіндукції z_{kp} і z_{op} . Крім того, як було показано на рисунку 2.4, між струмами $I_o=I_{T2}$ і $I_K=I_{T1}$ не має повної рівності по величині і зсув по фазі ψ_T відрізняється від 180° . З цих причин струми I_K і I_o індукують у рейках неоднакові ЕРС E_{pk} і E_{po} (рисунок 3.1, а).



а – схема ділянки; б – діаграми струмів, що створюють транзитну складову індукованої в суміжній лінії напруги; в – діаграми струмів, що створюють транзитну складову індукованої в суміжній лінії напруги

Рисунок 3.1 – Ділянка з відсмоктувальними трансформаторами, увімкненими вторинною обмоткою зі зворотним проводом і з декількома електровозами

Результуюча ЕРС E_p викликає в рейках струм I_{pko} , що відстає від E_p на кут ψ_p , обумовлений співвідношенням індуктивного й активного опорів рейок.

Таким чином, на суміжну лінію С (рисунок 3.2) впливає система з трьох проводів тягової мережі (К, О, Р); опори

взаємодія від кожного з цих проводів до суміжної лінії Z_{kc} , Z_{oc} , Z_{pc} не рівні і струми, що протікають у них, розрізняються за величиною і фазою. Векторні діаграми впливу тягової мережі з відсмоктувальним зворотним проводом на суміжну лінію подано на рисунку 3.3.

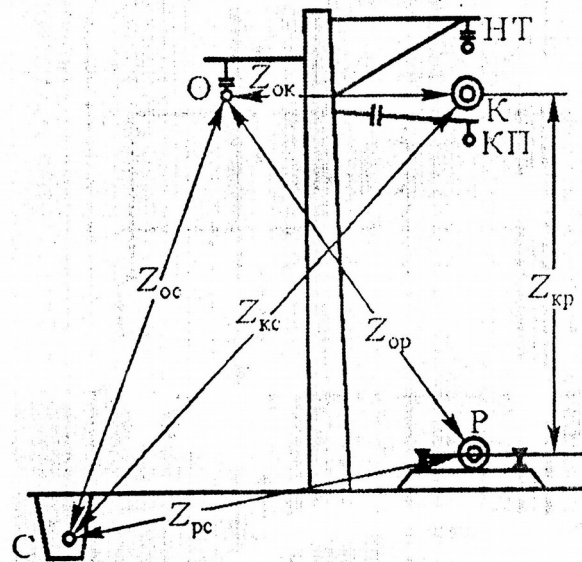
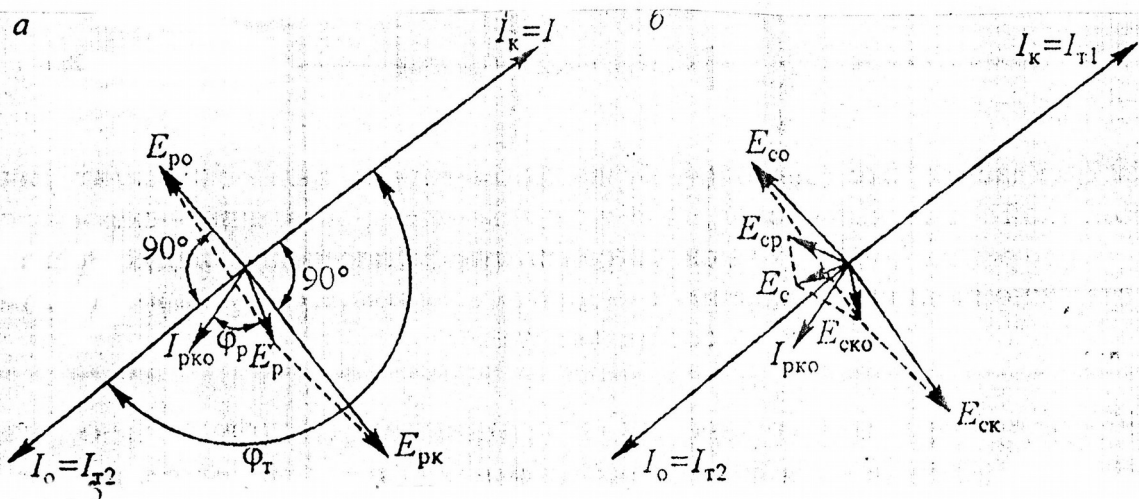


Рисунок 3.2 – Схема взаємного розташування проводів тягової мережі і суміжної лінії



а – діаграма для визначення індукованого в рейках струму I_{pko} ;
 б – діаграма для визначення результуючої ЕРС у суміжній лінії E_C

Рисунок 3.3 – Векторні діаграми впливу тягової мережі з відсмоктувальними трансформаторами і зворотним проводом на суміжну лінію

Ступінь зниження небезпечного магнітного впливу при увімкненні в тягову мережу відсмоктувальних трансформаторів прийнято оцінювати їх коефіцієнтом захисної дії r_r . Величина цього коефіцієнта визначається як відношення максимальної результуючої індуктивної напруги при увімкнених відсмоктувальних трансформаторах у тяговій мережі (для однієї і тієї ж довжини зближення комунікації з тяговою мережею й однаковою кількістю електровозів на довжині l_a):

$$r = \frac{U_r}{U}. \quad (3.1)$$

Як випливає з цієї формули, коефіцієнт захисної дії (КЗД) – величина комплексна, так як усі величини, що визначають його, є комплексними.

Результуючий КЗД відсмоктувальних трансформаторів для одноколійної ділянки при робочому режимі визначається за формулами:

$$r_r = r_{r1} + r_{r2}, \quad (3.2)$$

$$r_r = r_{r1} + r_{r3}, \quad (3.3)$$

де

$$r_{r1} = v_a * v_n * v_{про} * v_z \left[1 + 3 \frac{K_a - K_2 K_d}{1 - K_1 K_d} \right]. \quad (3.4)$$

У схемі без зворотного проводу максимальний потенціал рейок виникає по обидва боки від ізолюваного стику, ближнього до підстанції (у межах довжини зближення), і пропорційний сумарному струмові всіх електровозів у цьому перетині. У випадку короткого замикання однаковий максимальний потенціал виникає по обидва боки від усіх ізолюваних стиків, розташованих між підстанцією і місцем замикання. Ступінь зниження максимального потенціалу рейкової мережі при m електровозах можна визначити за формулою

$$r_u = \frac{2v_a m}{1 - K1\vartheta} (C + K) th \frac{\gamma l_0}{2}. \quad (3.5)$$

При короткому замиканні варто прийняти $m=1$.

3.1.1 Зниження максимального струму в землі

Зворотний струм електротяги при увімкненні відсмоктувальних трансформаторів протікає в основному по зворотному проводу або рейковій мережі, що веде до зниження струму витoku. Ступінь зниження максимального струму в землі при цьому одержимо за виразом

$$r = \frac{v_{\text{я}}}{1 - K_{1\text{э}}} \left\{ [1 - K_{1\text{э}} + C(1 - K_{2\text{э}})] + v_{\text{мо}} C(1 - K) 1 - e^{-\gamma} p \frac{l_0}{4} \right\} \quad (3.6)$$

За розрахунковий варто брати найбільший по модулю результат розрахунків при $K=K_1$ або $K=K_2$.

При відсмоктувальних трансформаторах без зворотного проводу ступінь зниження максимального струму в землі (рисунок 3.4, б) визначимо за формулою

$$r = \frac{vz}{1 - K_{1\text{э}}} \left[1 - K_1 + \frac{2(C + K_1)e^{\frac{\gamma p l_0}{2}}}{1 + e^{\gamma p l_0}} \right]. \quad (3.7)$$

Ступінь зниження гальмівного впливу при тимчасовому замиканні рухомим складом вторинних обмоток відсмоктувальних трансформаторів визначають за формулами (3.5) і (3.7) для подвоєної величини l_0 .

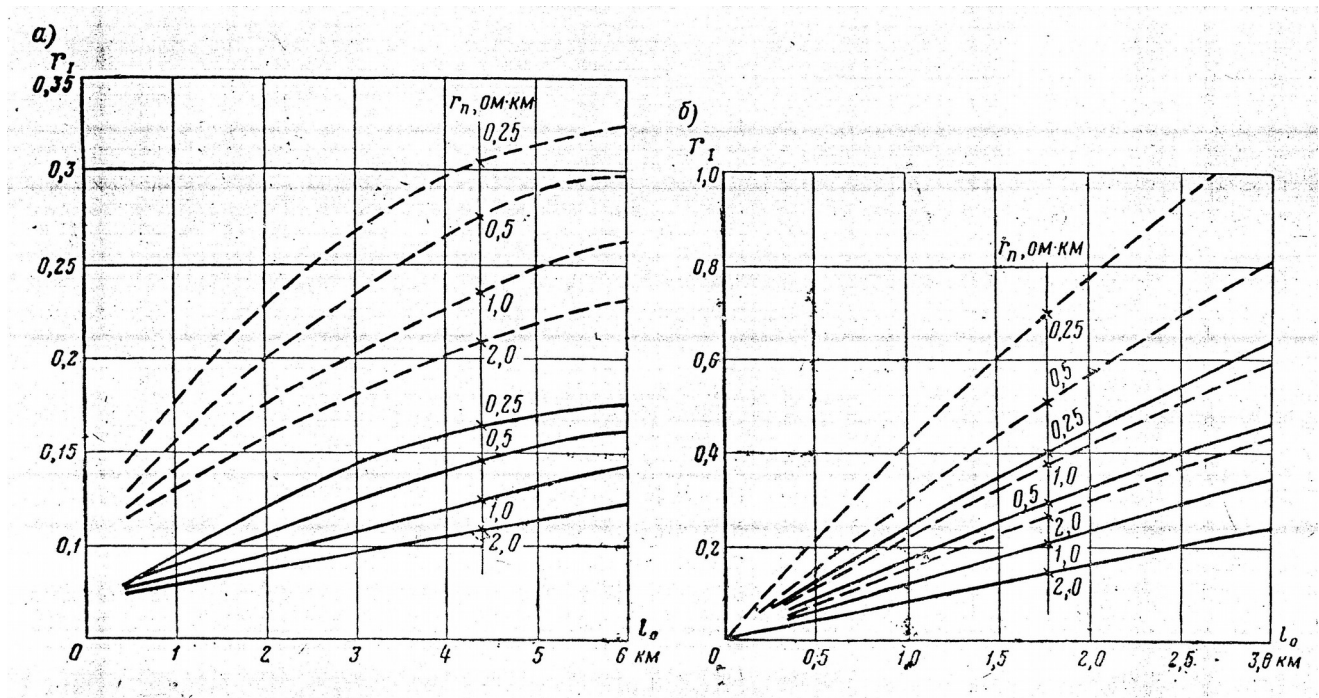


Рисунок 3.4 – Залежність коефіцієнта r_1 в робочому режимі від відстані l_0 при трансформаторах із зворотним проводом (а) і без нього (б) на одноколіній ділянці (безперервні лінії) при $m_s = 5$ і двоколіній (штрихові лінії) при $m_s = 10$, $l_u = l_a = 3$ км

3.2 Попереднє завдання

3.2.1 Вивчити побудову, схему вмикання відсмоктувальних трансформаторів та захисну їх дію в мережах електропостачання змінного струму 27,5 кВ.

3.2.2 Накреслити дослідну схему згідно з рисунком 3.5.

3.2.3 Розрахункові дані $R_{до}$, $R_{ро}$, R_o взяти з таблиці теоретичної частини.

3.2.4 Згідно з визначеними I_k , I_p , I_o , U_k , U_p , U_d побудувати епюри, аналогічні рисунку 3.4.

3.2.5 Накреслити таблиці 3.1 та 3.2 розрахункових і експериментальних досліджень.

3.3 Робоче завдання

3.3.1 Виконати вимірювання напруги і струму при навантаженнях $R_{н1}$, $R_{н2}$, $R_{н3}$.

3.3.2 Визначити екрануючу дію ВТ 1, ВТ 2 і ВТ 3 із зворотним проводом.

3.4 Виконання завдання

УВАГА! На лабораторному стенді діє висока напруга 220 В. Усі перемикачання на лабораторному стенді виконувати з вимкненою напругою. Подавати напругу на стенд тільки з дозволу викладача.

3.4.1 Перший дослід

З'єднати гнізда XS 2 з XS 3, XS 16 з XS 15, XS 19 з XS 20, XS 23 з XS 24, XS 27 з XS 28, XS 32 з XS 33, XS 35 з XS 36, XS 39 з XS 40, XS 17 з XS 31, XS 35 з XS 20, XS 24 з XS 39.

Увімкнути вмикач SW 1 і виміряти напругу між гніздами: XS 1 і XS 2, XS 7 і XS 17, XS 17 і XS 31, XS 7 і XS 35 і струмів між гніздами: XS 6 і XS 7, XS 14 і XS 15, XS 32 і XS 33.

Усі вимірянні дані занести в таблицю 3.1.

3.4.2 Другий дослід

Увімкнути вмикач SW 2 і виміряти напругу між гніздами згідно з пунктом 3.4.1 XS 10 і XS 24, XS 10 і XS 33, XS 28 і XS 41 і струм згідно з пунктом 3.4.1 XS 8 і XS 9, XS 10 і XS 11, XS 32 і XS 33, XS 35 і XS 36, XS 39 і XS 40.

Усі вимірянні дані занести в таблицю 3.1.

3.4.3 Третій дослід

Увімкнути вмикач SW 3 і виміряти напругу між гніздами згідно з пунктом 3.4.1 XS 13 і XS 24, XS 13 і XS 36, XS 36 і XS 24 і струм між гніздами XS 12 і XS 13, XS 24 і XS 26, XS 34 і XS 36.

Усі вимірянні дані занести в таблицю 3.1.

3.5 Обробка результатів досліджень

3.5.1 Графічна робота:

- накреслити схему й епюри розділу струмів (аналогічно з рисунками 3.5 -3.7);
- накреслити залежність $R_c = f(I)$ і порівняти з наведеними в теоретичній частині (рисунки 3.8).

3.5.2 Розрахункова робота:

- згідно з формулами зробити розрахунок опорів, напруг і струмів (контактні проводи, рейки, відсмоктувальні трансформатори) та порівняти з наведеними в теоретичній

частині;

- зробити розрахунок залежності $R_c = f(l)$ і порівняти з наведеними в теоретичній частині.

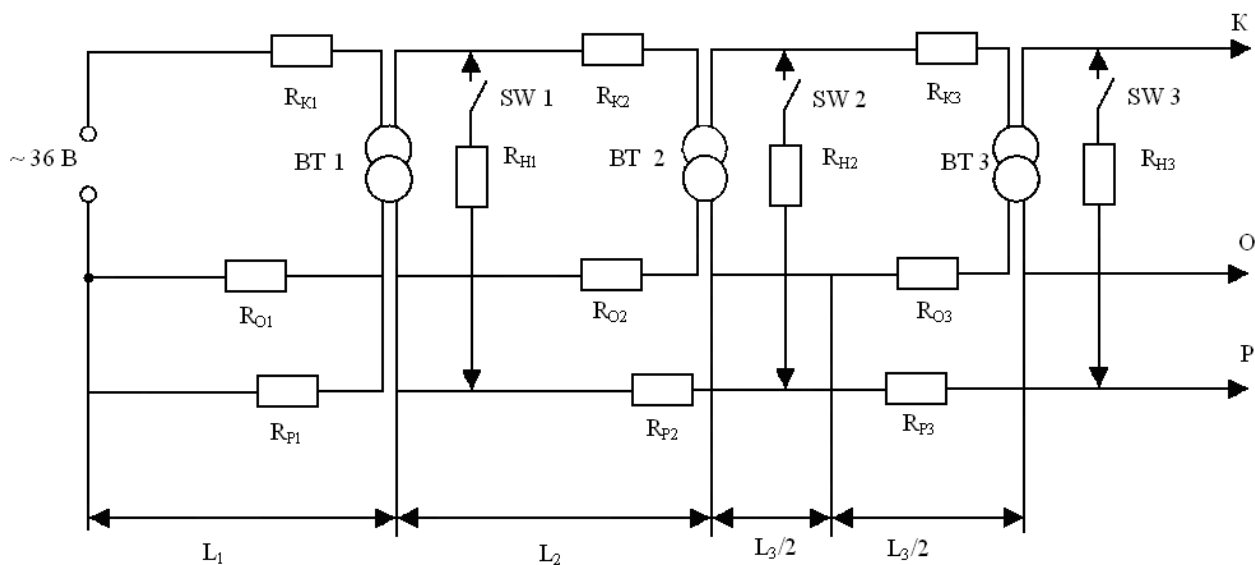
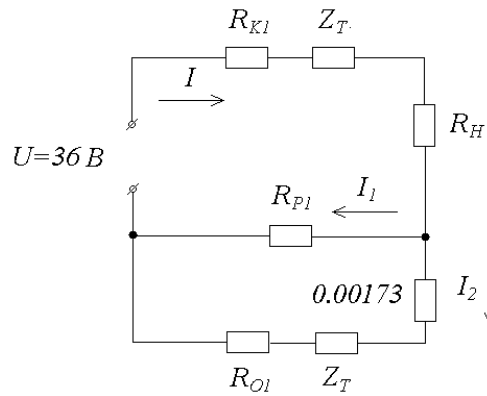


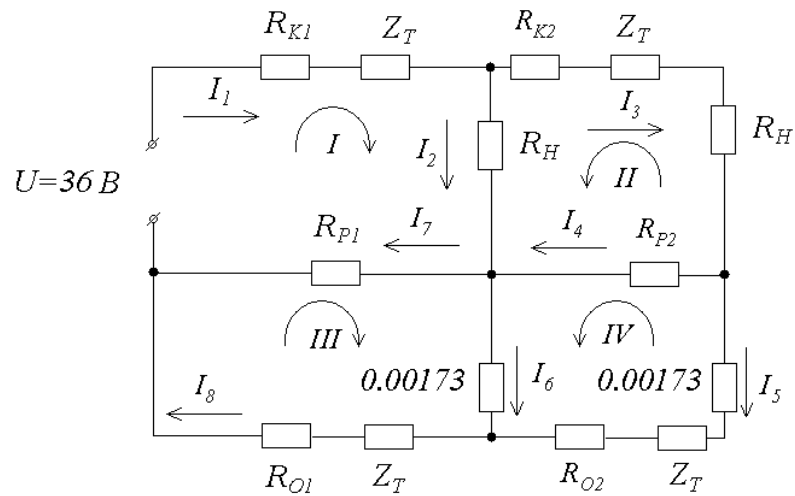
Рисунок 3.5 – Еквівалентна схема з відсмоктувальним трансформатором і зворотним проводом

Екрануюча дія відсмоктувального трансформатора із зворотним проводом на відстані 3 км від підстанції з одним локомотивом розраховується за схемою рисунка 3.6, а.

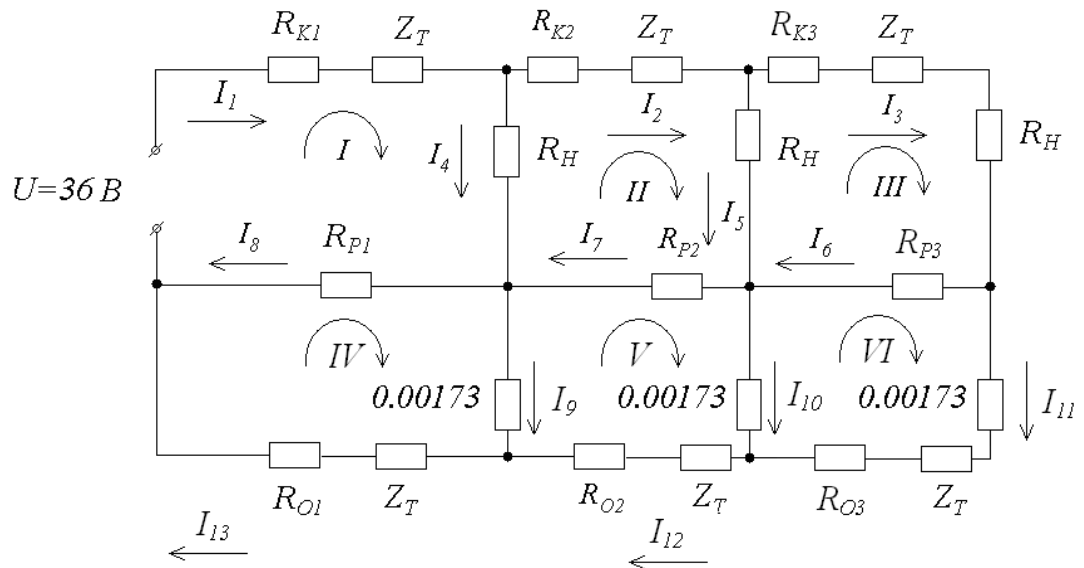
a)



б)



в)



а – екрануюча дія відсмоктувального трансформатора із зворотним проводом на відстані 3 км від підстанції з одним локомотивом; б – екрануюча дія відсмоктувального трансформатора із зворотним проводом на відстані 8 км від підстанції з двома локомотивами; в – екрануюча дія відсмоктувального трансформатора із зворотним проводом на відстані 13 км від підстанції з трьома локомотивами

Рисунок 3.6 – Еквівалентні схеми для розрахунків параметрів

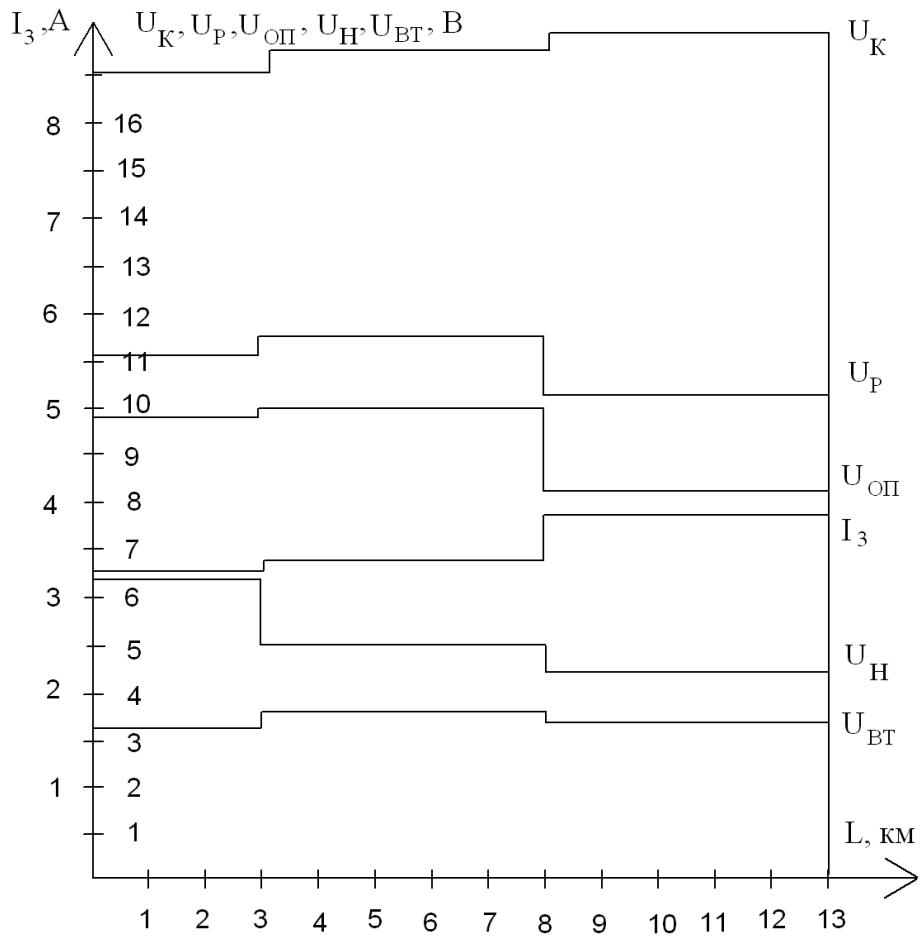


Рисунок 3.7 – Епюри розподілу напруги і струму навантаження уздовж фідерної зони

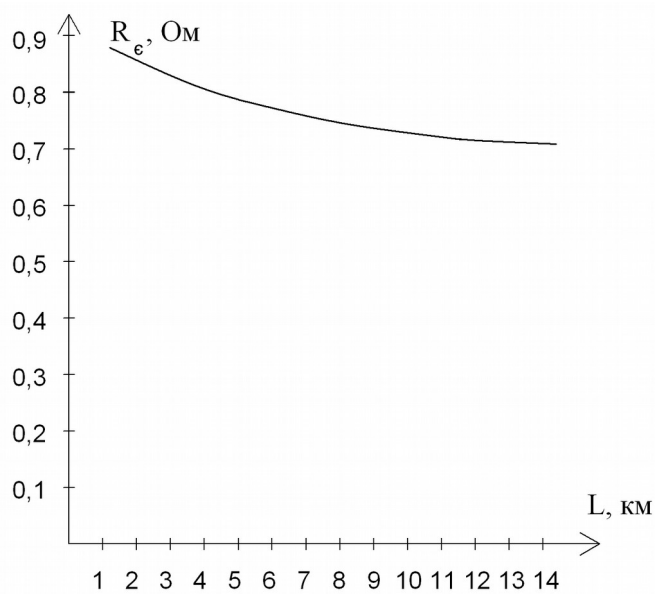


Рисунок 3.8 – Графік екрануючої дії відсмоктувальних

трансформаторів із зворотним проводом

Таблиця 3.1 – Результати дослідів

Величина		Результати дослідів		
		L=3 км	L=8 км	L=13 км
Падіння напруги в контактній мережі, В				
Падіння напруги в рейках, В				
Падіння напруги на навантаженні, В				
Падіння напруги в ВТ, В				
Падіння напруги на перемичці, В				
Струми в ланцюгах, А	I			
	I_1			
	I_2			
	I_3			
	I_4			
	I_5			
Напруга на зворотному проводі, В				
Екрануюча дія ВТ із зворотним проводом				

Таблиця 3.2 – Результати розрахунків

Величина		Результати розрахунків		
		L=3 км	L=8 км	L=13 км
Падіння напруги в контактній мережі, В		7,579	17,905	17,911
			3,503	3,809
				0,272
Падіння напруги в рейках, В		8,753	8,906	8,91
			1,47	1,493
				0,143
Падіння напруги на навантаженні, В		6,065	5,54	5,534
			0,631	0,578
				0,06
Падіння напруги в ВТ, В		3,586	0,373	3,65
		1,481	0,161	1,507
				0,378
				0,162
Падіння напруги на перемичці, В				0,036
				0,015
Падіння напруги на перемишці, В		$2,368 \cdot 10^{-3}$	$2,152 \cdot 10^{-2}$	$2,15 \cdot 10^{-3}$
			$2,578 \cdot 10^{-4}$	$2,53 \cdot 10^{-4}$
				$2,422 \cdot 10^{-5}$
Струми в ланцюгах, А	I	3,314	3,372	3,73
	I_1	1,945	3,372	3,73
	I_2	1,369	3,021	0,344
	I_3		0,345	0,033
	I_4		0,196	3,024
	I_5		0,149	0,316
Напруга на зворотному проводі, В		7,269	7,397	3,397
			1,319	1,328
				1,328
Екрануюча дія ВТ із зворотним проводом		0,87	0,846	0,83

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Бадер М.П. Электромагнитная совместимость. – М.: УМК МПС, 2002. – 638 с.

2 Павлов И.В. Отсасывающие трансформаторы в тяговых сетях. – М.: Транспорт, 1965. – 204 с.

3 Марквардт К.Г. Энергосбережение электрических железных дорог. – М.: Транспорт, 1965. – 464 с.

4 Давыдова Н.К., Попов Б.И. Справочник по эксплуатации тяговых подстанций и постов секционирования. – М.: Транспорт, 1978. – 416 с.

