

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**Український державний університет
науки і технологій**

Кафедра «Інтелектуальні системи енергопостачання»

ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт

Електронний аналог
друкованого видання

ДНПРО
2023

УДК 621.331
Е 50

Укладачі:

Д. О. Босий, А. В. Антонов, Д. Р. Земський

Рецензенти:

д.т.н., професор *А. М. Афанасов* (УДУНТ)
Д. М. Яценко (ПВІЗТ)

Рекомендовано МКФ «УЕП» (протокол № 2 від 15.11.2022)
Зарєстровано НВМ УДУНТ (№ 612 від 17.05.2023)

Е 50 Електропостачання електричного транспорту : методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт / уклад.: Д. О. Босий, А. В. Антонов, Д. Р. Земський ; Укр. держ. ун-т науки і технологій. – Дніпро : УДУНТ, 2023. – 51 с.

Методичні рекомендації містять лабораторні роботи з дисципліни «Електропостачання електричного транспорту». До кожної роботи наведено короткі теоретичні відомості, порядок виконання, зміст звіту та контрольні питання для самоперевірки.

Призначені для студентів IV курсу денної та безвідривної форм навчання спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (галузь знань 14 «Електрична інженерія»)), можуть бути використані слухачами інституту післядипломної освіти.

Іл. 18. Табл. 14. Бібліогр.: 13 назв.

© Босий Д. О. та ін., укладання, 2023

© Укр. держ. ун-т науки і технологій, 2023

ЗМІСТ

ВСТУП	4
ПРАВИЛА ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ ПРИ ВИКОНАННІ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ	5
ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ ТА ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТІВ	6
1. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1. ДОСЛІДЖЕННЯ СХЕМ ЖИВЛЕННЯ ТА СЕКЦІОНУВАННЯ ТЯГОВОЇ МЕРЕЖІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	7
2. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2. ДОСЛІДЖЕННЯ СХЕМ ЖИВЛЕННЯ ТА СЕКЦІОНУВАННЯ ТЯГОВОЇ МЕРЕЖІ ЗМІННОГО СТРУМУ	18
3. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3. ДОСЛІДЖЕННЯ СХЕМ ЖИВЛЕННЯ ТЯГОВОЇ МЕРЕЖІ ПОСТІЙНОГО ТА ЗМІННОГО СТРУМУ ПРИ НАЯВНОСТІ ВИРІВНЮВАЛЬНИХ СТРУМІВ.....	23
4. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4. ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ СТРУМІВ В ТЯГОВОМУ ТРАНСФОРМАТОРІ В РІЗНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ	28
5. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5. ВИЗНАЧЕННЯ ПОТУЖНОСТІ КОМПЕНСУЮЧОГО ПРИСТРОЮ НА ТЯГОВІЙ ПІДСТАНЦІ ЗМІННОГО СТРУМУ.....	33
6. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6. ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСИМЕТРІЇ НАВАНТАЖЕННЯ ТЯГОВОЇ ПІДСТАНЦІ ЗМІННОГО СТРУМУ.....	37
7. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7. ДОСЛІДЖЕННЯ ГАРМОНІЙНИХ СПОТВОРЕНЬ ТЯГОВОЇ ПІДСТАНЦІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	41
8. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 8. ДОСЛІДЖЕННЯ ГАРМОНІЙНИХ СПОТВОРЕНЬ В ТЯГОВІЙ МЕРЕЖІ ЗМІННОГО СТРУМУ	46
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК.....	50

ВСТУП

Сукупність електротехнічних пристроїв, починаючи від генераторів електростанцій і закінчуючи тяговою мережею, складає систему електропостачання електричного транспорту, яка за вимогами до неї, умовам роботи, використанням устаткування і пристроїв і, нарешті, за завданнями, що вирішуються цією системою, докорінно відрізняється від систем електропостачання промислових підприємств. Усе це визначило особливості теорії роботи таких систем, методів їх розрахунку і проектування, призвело до появи науки про електропостачання електричного транспорту.

Основним завданням системи електропостачання є забезпечення експлуатаційної роботи залізниці, міського наземного та підземного електротранспорту. Для цього необхідно, щоб загальна потужність усіх елементів системи електропостачання була достатньою для забезпечення потрібної кожному споживачу потужності при різних умовах роботи електрифікованої лінії. Це завдання може бути вирішене тільки при правильно вибраних параметрах системи електропостачання, які забезпечують роботу устаткування в допустимих для нього межах за навантаженням і необхідну якість електричної енергії, в першу чергу за рівнем напруги.

Виконання лабораторних робіт дозволяє студентам застосовувати теоретичні знання, отримані за час учбового процесу, безпосередньо на практиці і, відповідно, прийти на підприємство підготовленими і грамотними фахівцями свого профілю. Лабораторні заняття готують студента до наступної практичної діяльності. Для найбільш ефективного використання учбового часу, що відводяться на лабораторні заняття, знайомство студентів з метою і змістом занять, а також підготовка звітів до них проводяться заздалегідь у вигляді домашнього завдання.

Метою лабораторних робіт є наочне знайомство студентів з специфікою роботи, виявлення недоліків та їх усунення при експлуатації електрифікованих ліній постійного та змінного струму.

Дисципліна «Електропостачання електричного транспорту» відноситься до вибіркової компоненти освітньої програми «Електротехнічні системи електроспоживання».

Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт сприяють досягненню наступних очікуваних результатів навчання: відтворювати термінологію в області систем електропостачання та, зокрема, для електропостачання електричного транспорту, описувати принцип побудови систем електропостачання залізниць, міського наземного та підземного електротранспорту, розраховувати миттєві схеми для різної конфігурації схем живлення тягової мережі.

ПРАВИЛА ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ ПРИ ВИКОНАННІ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Забезпечення безпеки лабораторних робіт – основна умова їх проведення. В учбовій лабораторії повинні бути вивішені правила безпеки, яких студенти зобов'язані дотримуватись в процесі занять. Робота з електричними апаратами і приладами в лабораторії «Електропостачання залізниць» становить небезпеку для життя – всі види напруг, що використовуються в лабораторії, є небезпечними.

У зв'язку з цим необхідно суворо виконувати наведені нижче правила.

1. Не працювати на несправному устаткуванні, про всі помічені несправності або виниклі сумніви повідомити негайно викладача або лаборанта.

2. Збирати схему лабораторної роботи тільки за умови відключених джерел живлення.

3. Не робити заміни запобіжників і усунення несправностей у джерел живлення і лабораторного устаткування без дозволу викладача або лаборанта.

4. Розташовувати устаткування і прилади так, щоб забезпечувалося наочне їх з'єднання, зручне і безпечне виконання лабораторної роботи. Ніяких зайвих предметів (портфелів, згорток, приладів і т. п.) на робочому столі під час виконання роботи не повинно бути.

5. Подавати напругу на зібрану схему лабораторної роботи можна тільки після перевірки її викладачем і отримання дозволу від нього. При цьому необхідно переконатися, що ніхто з присутніх не торкається струмоведучих частин. Перед подачею напруги бригадир повинен чітко і голосно оповістити «Обережно! Вмикаю!» і лише після цього подати напругу на схему лабораторної роботи.

6. Не торкатись неізольованих струмоведучих частин під час виконання лабораторної роботи.

7. Не робити операції з відключення і підключення проводів і зі зміни схеми, що знаходяться під напругою.

8. Дотримуватись особливої обережності за наявності в електричних колах котушок з великим числом витків і конденсаторів.

9. Не дозволяється працювати в незастебнутому одязі і шарфах.

10. Забороняється спиратись ліктем на апарати і різні пристрої, сідати на них, торкатись до механічних рухомих частин, пересувати устаткування, що знаходиться в робочому стані.

11. Розбирати схему можна тільки після зняття з неї напруги.

12. Студенти допускаються до виконання лабораторних робіт тільки після ознайомлення з правилами техніки безпеки і внутрішнього розпорядку в лабораторії «Електропостачання залізниць», інструктажу з техніки безпеки відповідно до діючих правил при обслуговуванні електроустановок, затвердженими Держенергонаглядом і розпису в журналі про отримання інструктажу.

ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ ТА ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТІВ

1. До виконання лабораторних робіт кожен студент повинен підготуватись за основною і додатковою літературою. Непідготовлені студенти до виконання робіт не допускаються.

2. Кожен студент зобов'язаний вести робочий зошит, в який заносяться наступні відомості:

- назва і мета роботи;
- необхідні дані, розрахунки, векторні діаграми і т. д.;
- таблиці для запису спостережень;
- схеми електричних з'єднань;
- таблиця для запису характеристик засобів вимірювальної техніки, що використовуються в лабораторній роботі;
- ґрунтовні висновки за виконаною роботою.

3. Для складних схем необхідно спочатку збирати силові кола, а потім кола керування, захисту, сигналізації і т.ін.

4. Приступають до виконання роботи тільки тоді, коли чітко встановлена послідовність її виконання і розподіл обов'язків між членами бригади.

5. Після закінчення роботи слід показати результати вимірювань і побудувати за ними графіки, не розбираючи схеми. Після перевірки результатів викладачем схему потрібно розібрати і розташувати прилади, апаратуру і з'єднувальні проводи в такому порядку, в якому вони були перед початком роботи.

6. Звіти до лабораторних робіт оформлюються в спеціально виділених зошитах. Схеми виконуються з дотриманнями вимог діючих стандартів. За бажанням студентів окремі графіки можуть бути виконані з використанням комп'ютерної техніки.

7. Звіт до лабораторної роботи студент подає викладачу на наступному черговому занятті в лабораторії.

Студенти, які не надали звіту до попередньої лабораторної роботи, не допускаються до виконання наступної. Пропущена лабораторна робота виконується в інший день згідно з графіком відпрацювання лабораторних робіт.

8. При підготовці до виконання лабораторної роботи корисно ознайомитись з літературою, на яку в тексті кожної роботи є посилання із загального бібліографічного списку.

9. Для підготовки до захисту лабораторних робіт у кінці методичних вказівок до кожної роботи наводяться контрольні питання до самоперевірки.

ДОСЛІДЖЕННЯ СХЕМ ЖИВЛЕННЯ КОНТАКТНОЇ МЕРЕЖІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Мета: визначити закономірності розподілу струмів в контактній мережі при різних схемах живлення; оцінити вплив схем живлення на величину напруги на струмоприймачеві електровозу; дослідним шляхом перевірити формули для визначення навантажень по фідерам, загальнопідстанційних навантажень, падінь напруги і ККД тягової мережі; виконати порівняння різних схем живлення для заданої ділянки.

Короткі теоретичні відомості

Надійність роботи контактної мережі залежить від схеми живлення і секціонування контактної мережі на окремі частини (секції), що дозволяє відключити при пошкодженні контактної мережі або її ремонті тільки невелику ділянку. Рейкова мережа, при цьому, для тягового струму не секціонується.

Схема секціонування контактної мережі визначається експлуатаційними умовами. Контактна мережа на секції може бути розділена за допомогою ізолюючих спряжень або секційних ізоляторів і нейтральних вставок (рис. 1). З рис. 1 видно, що нейтральна вставка являє собою послідовне з'єднання двох ізолюючих спряжень і за нормальної схеми не має напруги. Нейтральні вставки застосовуються також при стикуванні ділянок однієї системи струму, але різних напруг, у випадку живлення суміжних секцій від різних фаз трифазної системи.

Складаючи схеми живлення контактної мережі, в першу чергу обирають схему паралельної або роздільної роботи підстанцій на контактну мережу, тобто схему одностороннього або двостороннього живлення мережі. Потім визначають доцільність поперечних з'єднань між підвісками окремих колій. Схеми живлення при порівнянні оцінюють за техніко-економічними показниками, при цьому беруть до уваги втрати енергії, необхідні потужності підстанцій і переріз проводів контактної мережі, втрати напруги і довжину ділянки, яку доводиться відключати при виникненні короткого замикання.

Схеми одностороннього та двостороннього живлення

У разі роздільної роботи підстанцій, тобто при односторонньому живленні (рис. 2, а), проводи контактної мережі приблизно в середині ділянки між підстанціями розділяють ізолюючим сполученням або нейтральною вставкою на дві секції, і кожна секція живиться від однієї підстанції через свою лінію живлення (фідер). При паралельній роботі підстанцій (рис. 2, б), тобто при схемі двостороннього живлення, потяги, розташовані на ділянці між підстанціями, отримують живлення одночасно від двох підстанцій. У цьому випадку кожна секція отримує живлення одночасно від двох фідерів сусідніх підстанцій.

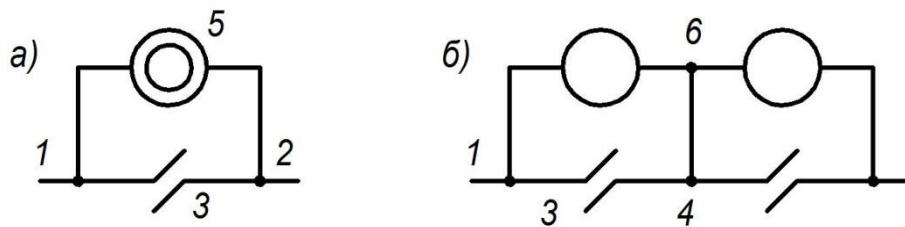


Рис. 1.1. Схеми розділення контактної мережі на секції за допомогою ізолюючого спряження (а) та нейтральної вставки (б): 1 і 2 – секції контактної мережі, що розділяються; 3 – ізолююче спряження; 4 – нейтральна вставка; 5 – секційний роз'єднувач з моторним приводом; 6 – секційний роз'єднувач з ручним приводом

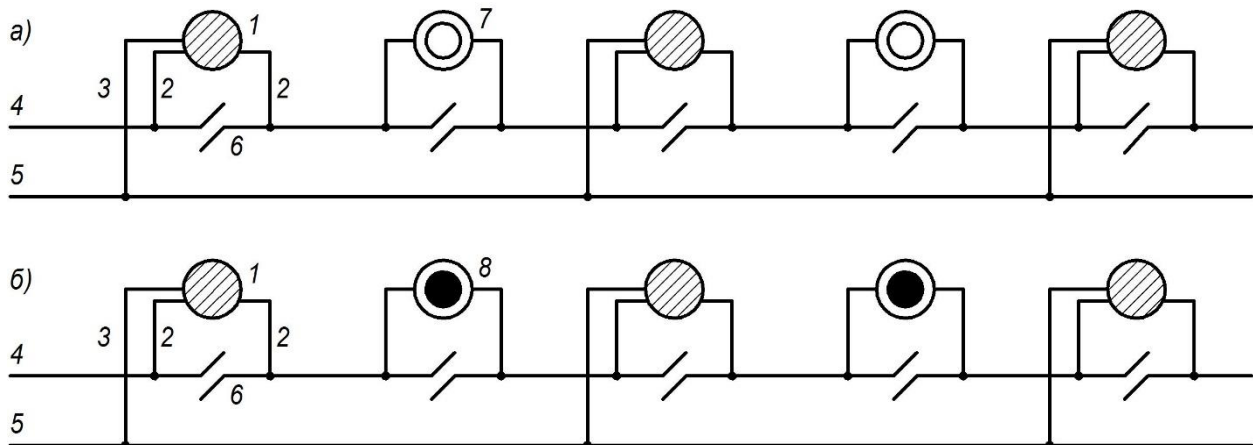


Рис. 1.2. Схеми одностороннього (а) та двостороннього (б) живлення контактної мережі: 1 – тягові підстанції; 2 – живлячі лінії (фідери); 3 – відсмоктуючі лінії; 4 – контактна мережа; 5 – рейки; 6 – секціонуючий пристрій; 7 – секційний роз'єднувач з моторним приводом нормально відключений; 8 – те ж нормально включений

Для першої та другої схеми кожна частина ділянки отримує живлення або від одного фідера (див. рис. 2, а), або від двох фідерів (див. рис. 2, б).

Розраховуючи струмозподіл в тяговій мережі для визначення навантажень фідерів, підстанцій, втрат напруги і втрат енергії, доводиться розглядати тільки ту частину тягової мережі, всі навантаження якої входять у визначення шуканого значення. Частина схеми, яка отримує живлення від одного і того ж фідера або від одних і тих же фідерів (на рис. 2, б – від двох фідерів), називається фідерною зоною. Частина ж схеми, яка приєднується безпосередньо до певної підстанції, незалежно від того, чи живиться ця ділянка від інших підстанцій, називається підстанційною зоною. Підстанційна зона складається з фідерних зон, що живляться фідерами даної підстанції.

При односторонньому живленні (див. рис. 2, а) фідерна зона менша, і пошкодження, які викликані короткими замиканнями, призводять до відключення меншої частини ділянки. Однак, при переході поїздів з однієї фідерної зони на іншу для уникнення з'єднання фідерних зон струмоприймачами поїздів, необхідно застосовувати секціонування з нейтральною вставкою, яке ускладнює мережу.

При двосторонньому живленні та одному локомотиві між підстанціями струм до нього надходить з двох сторін протягом усього часу, доки він знаходиться між даними підстанціями, тобто підстанції та контактна мережа завантажуються більш рівномірно за часом. Втрати ж енергії в лініях, нагрівання проводів і трансформаторів підстанцій зменшуються при зменшенні нерівномірності навантаження. Тому при двосторонньому живленні і рівних напругах на підстанціях втрати енергії і втрати напруги в мережі будуть меншими, а навантаження підстанцій більш рівномірним.

Пости секціонування і пункти паралельного з'єднання контактних підвісок

На двоколійних або багатоколійних ділянках контактні підвіски окремих колій можуть не мати з'єднання між собою – схема роздільного живлення колій (рис. 3, а) або можуть бути з'єднані за допомогою спеціальних пристроїв в одній точці – вузлова схема (рис. 3, б), або в декількох точках – схема паралельного з'єднання колій (рис. 3, в).

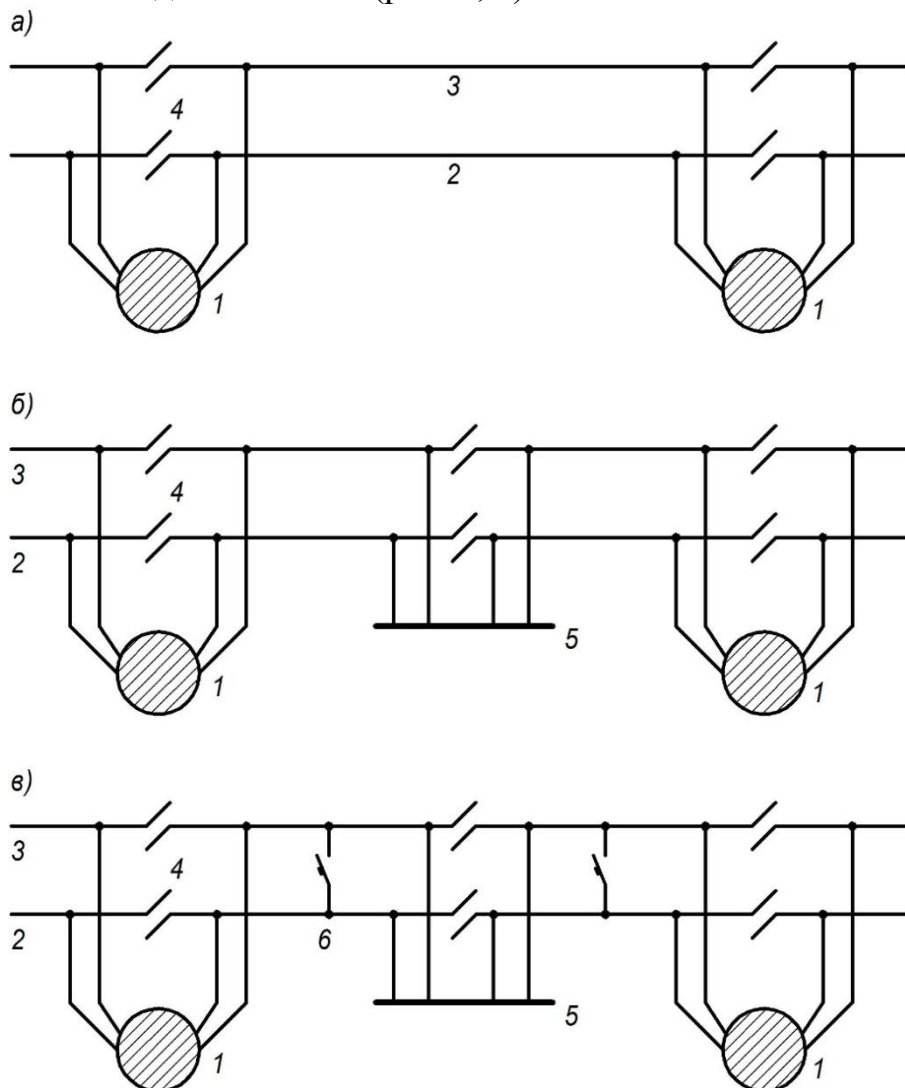


Рис. 1.3. Схеми живлення контактної мережі двоколіїної ділянки:
а – роздільне живлення колій; б – вузлова схема; в – паралельне з'єднання колій;
1 – тягові підстанції; 2 – контактна мережа 1-ї колії; 3 – контактна мережа 2-ї колії;
4 – секціонуючі пристрої; 5 – пост секціонування;
6 – пункт паралельного з'єднання контактної мережі колій

При вузловій схемі приблизно в середині фідерної зони встановлюється пост секціонування, на якому через вимикачі і роз'єднувачі електрично з'єднують між собою контактні підвіски обох колій. У разі пошкодження контактної мережі виходить з роботи не вся ділянка між підстанціями, а лише пошкоджена секція між підстанцією і постом секціонування. При паралельному з'єднанні колій (рис. 3, в), окрім поста секціонування, влаштовують ще пункти паралельного з'єднання контактної мережі колій, які електрично з'єднують контактні підвіски колії додатково в декількох точках. Коли пошкоджується контактна мережа однієї з колій, пункти паралельного з'єднання автоматично роз'єднують контактні підвіски, дозволяючи непошкодженій ділянці колії залишитись в роботі.

Поперечні з'єднання проводів контактної мережі суміжних колій багатоколіїної і двоколіїної ділянок вирівнюють навантаження в прогонах, зменшуючи втрати енергії і втрати напруги в мережі. Крім того, такі з'єднання покращують умови рекуперації енергії, полегшують передачу енергії від локомотива, що знаходиться в режимі рекуперації до локомотива, який знаходиться в тяговому режимі на іншій колії.

Ступінь зменшення втрат енергії і напруги при введенні в схему поперечних з'єднань залежить від таких факторів, як: співвідношення витрат енергії поїздами на першій і другій коліях (особливо при застосуванні рекуперації), ступеню використання пропускнуої спроможності, різнотипності поїздів, характеру зміни струму поїзда, числа поперечних з'єднань, їх розташування, співвідношення опорів проводів контактної мережі на обох коліях.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитись з особливостями роботи стенду моделювання режимів систем тягового електропостачання, послідовністю вмикань, перемикачів та вимірювання результатів.

2. Визначити за табл. 1.1 згідно з отриманим варіантом вихідні дані. Довжину ділянки прийняти $L = 24$ км, швидкість руху 60 км/год.

3. Для заданих схем живлення:

3.1. отримати струми фідерів тягових підстанцій при русі одного поїзду по заданій ділянці;

3.2. отримати величину напруги на струмоприймачеві електровозу при русі по фідерній зоні;

3.3. за отриманими даними заповнити табл. 1.2 та побудувати графіки струмів фідерів та напруги на струмоприймачеві електровозу.

4. За даними табл. 1.2 розрахувати витрати електроенергії на тягових підстанціях та втрати електроенергії в тяговій мережі.

5. За відомим значенням струмів фідерів визначити та побудувати епюри розподілу струмів та спаду напруги в контактній мережі в момент часу t_x , хв (див. табл. 1.1) для двосторонньої та вузлової схем живлення.

6. Розрахувати величину втрат електроенергії та виконати техніко-економічне порівняння досліджуваних схем живлення.

Таблиця 1.1

Вихідні дані

Варіант	Схеми живлення	Контактна мережа	Струм електровозу I_e, A	Момент часу $t_x, хв$
1	консольна, двостороння, вузлова, паралельна	М-120+МФ-150	1000	6
2		М-95+2МФ-100	1200	9
3		М-95+2МФ-150	1400	15
4		М-120+2МФ-100	1600	18
5		М-120+2МФ-150	1800	21

Примітки: напруги на шинах суміжних підстанцій приймаються рівними 3,3 кВ та не враховується їх внутрішній опір; пости секціонування для вузлових схем живлення розташовані всередині ділянки; крок рахунку 0,5 хв.; тип рейок – Р-65.

Таблиця 1.2

Результати моделювання

Схема живлення	Параме-три	t , хв									W , кВт·год	ΔW , кВт·год	ΔW , %
		0	3	6	9	12	15	18	21	24			
Консольна	I_{ϕ} , А												
	U_e , В												
	ΔU , В												
Двостороння (роздільне живлення колій)	$I_{\phi 1}$, А												
	$I_{\phi 2}$, А												
	U_e , В												
	ΔU , В												
Вузлова	$I_{\phi 1}$, А												
	$I_{\phi 2}$, А												
	$I_{\phi 3}$, А												
	$I_{\phi 4}$, А												
	U_e , В												
	ΔU , В												
Паралельна	$I_{\phi 1}$, А												
	$I_{\phi 2}$, А												
	$I_{\phi 3}$, А												
	$I_{\phi 4}$, А												
	U_e , В												
	ΔU , В												

Основні формули для виконання розрахунків

Нижче приведені формули для розрахунку струмів фідерів і напруги на струмоприймачеві при дослідженні руху одного електровозу.

Розрахунок консольної схеми живлення

Струм фідера $I_{\text{ф}}$ консольної схеми (рис. 1.4) визначається струмом електровозу I незалежно від координати його розташування, тобто $I_{\text{ф}} = I$.

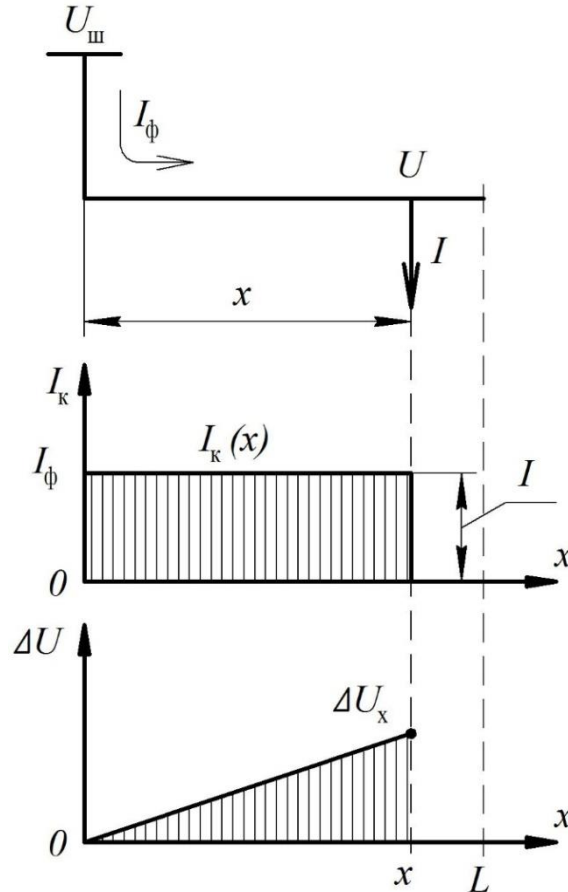


Рис. 1.4. Розрахункова схема, епюри струму і втрати напруги консольної схеми

Вираз для визначення напруги на струмоприймачі має наступний вигляд

$$U(x) = U_{\text{ш}} - I \cdot r_0 \cdot x, \quad (1.1)$$

де $U_{\text{ш}}$ – напруга на шинах тягової підстанції, В;

I – струм електровозу, А;

r_0 – питомий опір тягової мережі, Ом/км;

x – координата місцезнаходження поїзду (відстань від розрахункової тягової підстанції), км.

Розрахунок двосторонньої схеми живлення

Струми фідерів для двосторонньої схеми (рис. 1.5) визначаються добутком власного струму електровозу на обернено пропорційне відношення довжин від електровозу до кожної з підстанцій

$$I_{\phi 1}(x) = I \frac{L-x}{L}; \quad I_{\phi 2}(x) = I \frac{x}{L}. \quad (1.2)$$

де L – довжина ділянки, км.

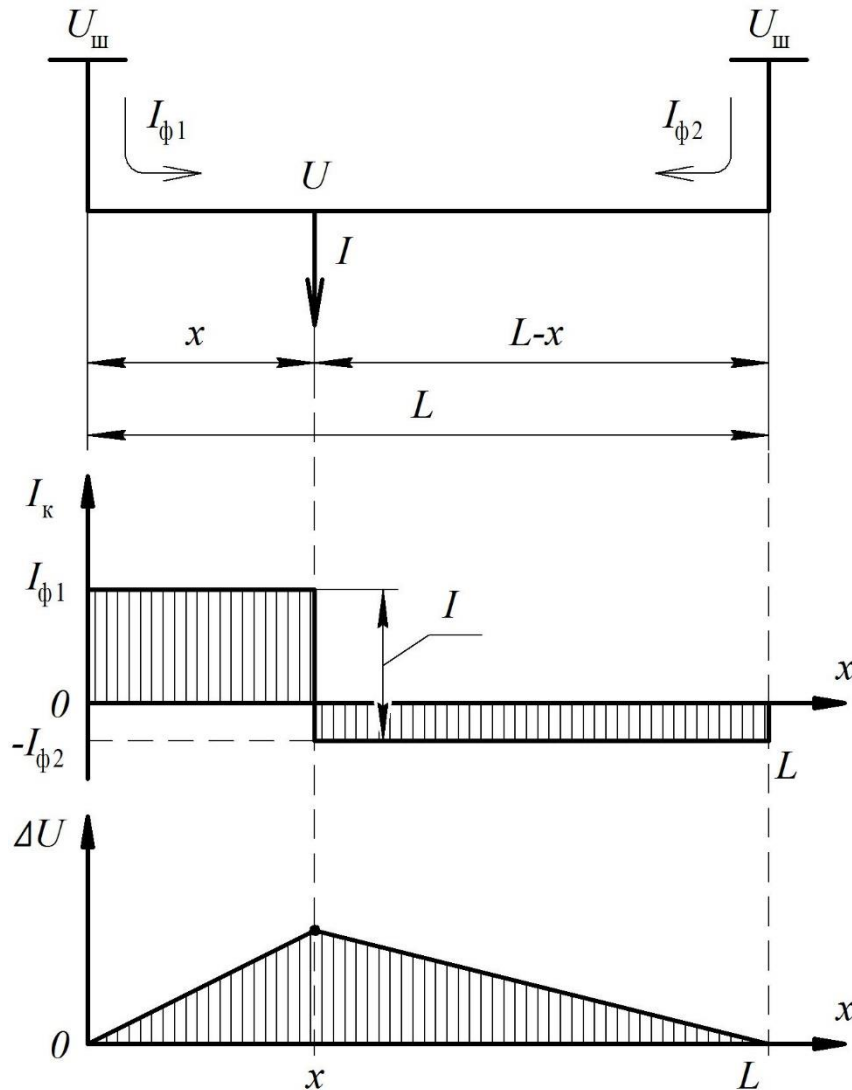


Рис. 1.5. Розрахункова схема, епюри струмів і втрати напруги двосторонньої схеми

Формула для визначення напруги на струмоприймачі враховує перерозподіл струмів у тяговій мережі обернено пропорційно відстаням до суміжних тягових підстанцій, тобто

$$U(x) = U_{\emptyset} - I \cdot r_0 \cdot \left(1 - \frac{x^2}{L} \right). \quad (1.3)$$

Розрахунок вузлової схеми живлення

Струми фідерів вузлової схеми (рис. 1.6) визначаються розташуванням електровозу відносно поста секціонування для кожного з чотирьох фідерів за наступними формулами

$$I_{\phi 1}(x) = I \times \begin{cases} 1 - \frac{L + l_C}{2Ll_C} x, & 0 \leq x \leq l_C; \\ \frac{1}{2} \left(1 - \frac{x}{L} \right), & l_C \leq x \leq L; \end{cases} \quad I_{\phi 2}(x) = I \times \begin{cases} \frac{L - l_C}{2Ll_C} x, & 0 \leq x \leq l_C; \\ \frac{1}{2} \left(1 - \frac{x}{L} \right), & l_C \leq x \leq L; \end{cases}$$

$$I_{\phi 3}(x) = I \times \begin{cases} \frac{x}{2L}, & 0 \leq x \leq l_C; \\ 1 - \frac{(2L - l_C)(L - x)}{2L(L - l_C)}, & l_C \leq x \leq L; \end{cases} \quad I_{\phi 4}(x) = I \times \begin{cases} \frac{x}{2L}, & 0 \leq x \leq l_C; \\ \frac{l_C(L - x)}{2L(L - l_C)}, & l_C \leq x \leq L; \end{cases}$$

де l_C – розташування поста секціонування, починаючи від першої підстанції, км.

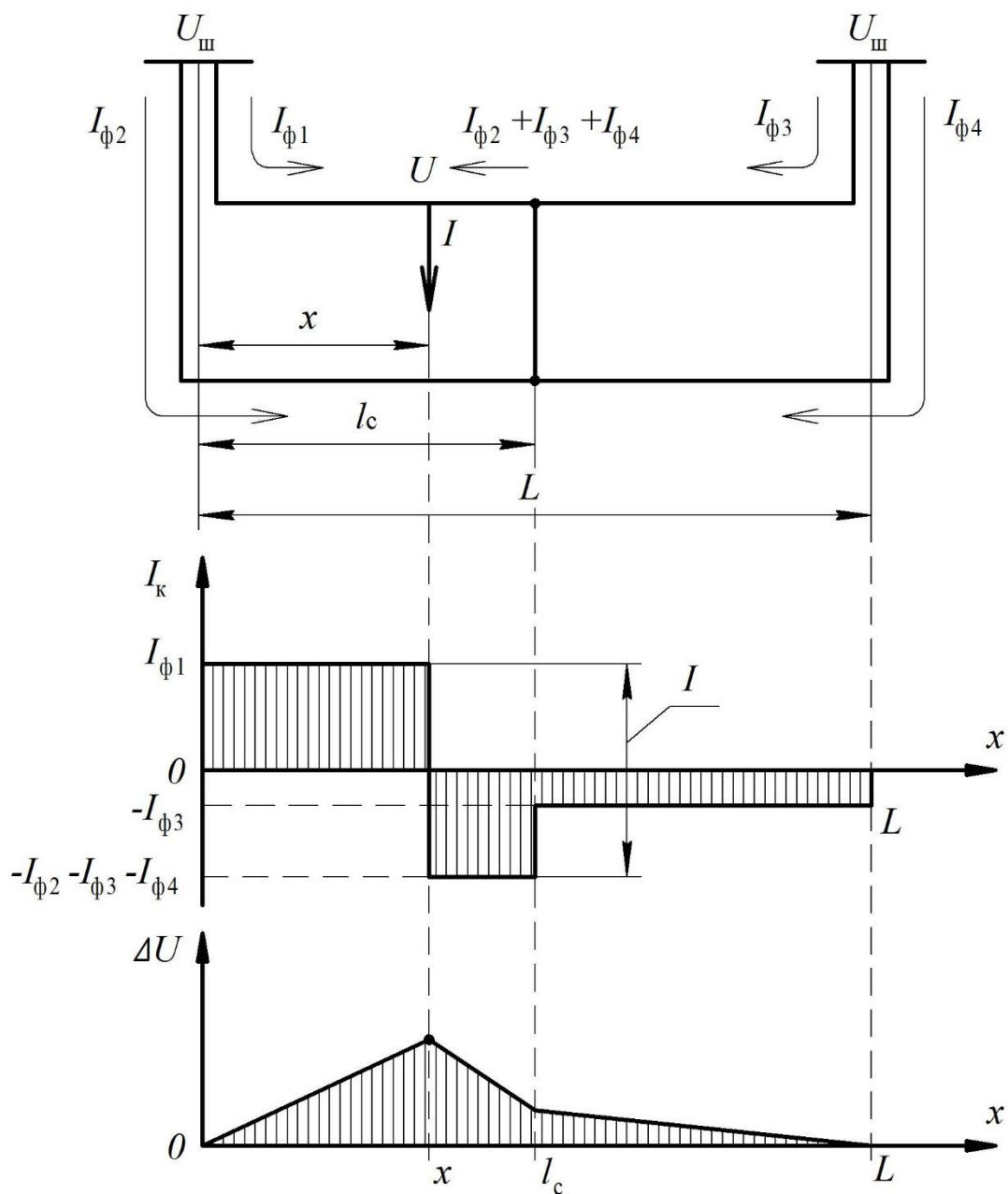


Рис. 1.6. Розрахункова схема, епюри струмів і втрати напруги вузлової схеми

Розрахунок напруги на струмоприймачі електровозу має вигляд сукупності рівнянь для кожної з двох зон тягової мережі (до поста секціонування та після нього).

$$U(x) = U_{\text{ш}} - I \cdot r_0 \times \begin{cases} x \left(1 - \frac{L + l_C}{2Ll_C} \cdot x \right), & 0 \leq x \leq l_C; \\ \frac{l_C}{2} \left(1 - \frac{x}{L} \right) + \left(1 - \frac{x}{L} \right) (x - l_C) + \frac{L - l_C}{2Ll_C} (L - x) (x - l_C), & l_C \leq x \leq L; \end{cases}$$

Розрахунок паралельної схеми живлення

Розподіл струму електровозу між фідерами тягової підстанції вузлової схеми живлення (рис. 1.7) визначаються формулами, подібними до вузлової схеми з відповідною заміною координати розташування поста секціонування на координати пунктів паралельного з'єднання контактних підвісок.

$$I_{\Phi 1}(x) = I \times \begin{cases} 1 - \frac{L + l_{\Pi 1}}{2Ll_{\Pi 1}} x, & 0 \leq x \leq l_{\Pi 1}; \\ \frac{1}{2} \left(1 - \frac{x}{L} \right), & l_{\Pi 1} \leq x \leq L; \end{cases} \quad I_{\Phi 2}(x) = I \times \begin{cases} \frac{L - l_{\Pi 1}}{2Ll_{\Pi 1}} x, & 0 \leq x \leq l_{\Pi 1}; \\ \frac{1}{2} \left(1 - \frac{x}{L} \right), & l_{\Pi 1} \leq x \leq L; \end{cases}$$

$$I_{\Phi 3}(x) = I \times \begin{cases} \frac{x}{2L}, & 0 \leq x \leq l_{\Pi 2}; \\ 1 - \frac{(2L - l_{\Pi 2})(L - x)}{2L(L - l_{\Pi 2})}, & l_{\Pi 2} \leq x \leq L; \end{cases} \quad I_{\Phi 4}(x) = I \times \begin{cases} \frac{x}{2L}, & 0 \leq x \leq l_{\Pi 2}; \\ \frac{l_{\Pi 2}(L - x)}{2L(L - l_{\Pi 2})}, & l_{\Pi 2} \leq x \leq L; \end{cases}$$

де $l_{\Pi 1}, l_{\Pi 2}$ – координати пунктів паралельного з'єднання підвісок, починаючи від першої підстанції, км.

Вираз для визначення напруги на струмоприймачі відносно вузлової ще більше ускладнюється. За такої схеми необхідно міжпідстанційну зону розбити на чотири розрахункові: між підстанціями і кожним пунктом паралельного з'єднання і між пунктами та постом секціонування. Результуюча формула виглядає наступним чином

$$U = U_{\text{ш}} - I \cdot r_0 \times \begin{cases} \left(1 - \frac{L + l_{\Pi 1}}{2Ll_{\Pi 1}} \cdot x \right) \cdot x, & 0 \leq x \leq l_{\Pi 1}; \\ \frac{l_{\Pi 1}}{2} \left(1 - \frac{x}{L} \right) + \left(1 - \frac{x}{L} \right) \frac{l_{\Pi 2} - x}{l_C} (x - l_{\Pi 1}) + \frac{x}{L} \cdot \frac{l_C - x}{l_C} (x - l_{\Pi 1}), & l_{\Pi 1} \leq x \leq l_C; \\ \frac{l_C}{2} \left(1 - \frac{x}{L} \right) + \left(1 - \frac{x}{L} \right) \frac{L - x}{l_C} (x - l_C) + \frac{x}{L} \cdot \frac{l_{\Pi 2} - x}{l_C} (x - l_C), & l_C \leq x \leq l_{\Pi 2}; \\ \frac{l_{\Pi 2}}{2} \left(1 - \frac{x}{L} \right) + \left(1 - \frac{x}{L} \right) (x - l_{\Pi 2}) + \frac{L - l_{\Pi 1}}{2Ll_{\Pi 1}} (L - x) (x - l_{\Pi 2}), & l_{\Pi 2} \leq x \leq L. \end{cases}$$

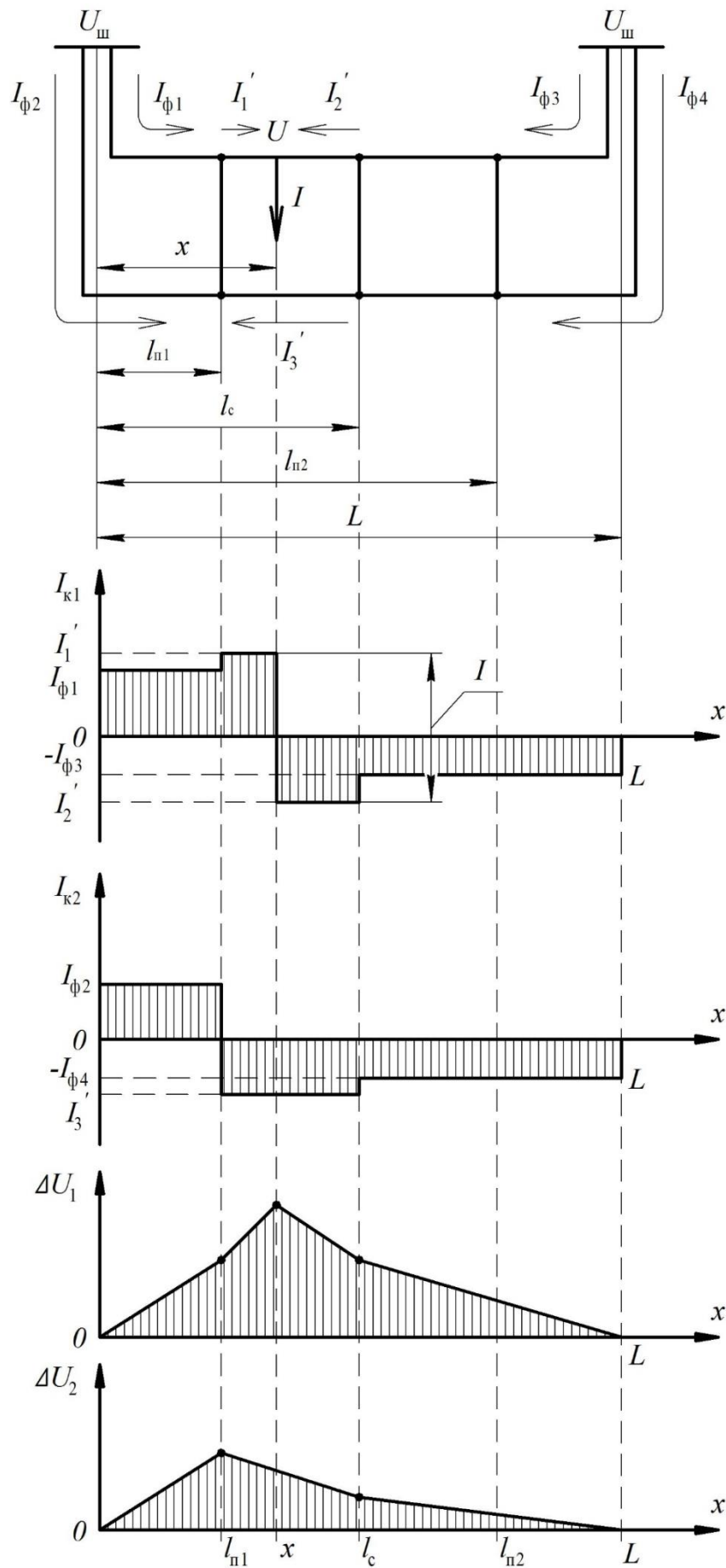


Рис. 1.7. Розрахункова схема, епюри струмів і втрат напруги паралельної схеми

Розрахунок інтегральних величин

Для усіх схем живлення витрати та втрати електроенергії обчислюються за однаковими формулами, у яких для спрощення операцію інтегрування замінено кінцевою сумою.

Витрати електроенергії по тяговим підстанціям, кВт·год

$$W = \frac{1}{N} U_{\phi} \cdot T \cdot \sum I_{\phi_i}, \quad (1.4)$$

де U_{ϕ} – напруга на шинах тягової підстанції, кВ;

T – час руху поїзда по розрахунковій зоні, год;

$\sum I_{\phi_i}$ – сума всіх значень струмів фідерів в контрольних точках, А;

N – кількість контрольних точок, $N = 9$.

Втрати електроенергії в тяговій мережі, кВт·год

$$\Delta W = W - W_e,$$

де W_e – витрата електроенергії поїдом, що рухається по розрахунковій зоні

$$W_e = \frac{1}{N} I_e \cdot T \cdot \sum U_{e_i}, \quad (1.5)$$

де $\sum U_{e_i}$ – сума значень напруги на струмоприймачеві електровозу в контрольних точках, кВ.

Відсоток втрат електроенергії в тяговій мережі $\Delta W \% = \frac{\Delta W}{W} \cdot 100 \%$.

Питомі втрати електричної енергії $B_0 = \frac{\Delta W}{L \cdot r_{\text{екв}}}$,

де $r_{\text{екв}}$ – еквівалентний опір тягової мережі

$$r_{\text{екв}} = \frac{\Delta W}{\frac{1}{N} T \cdot \sum I_{\phi_i}^2}, \quad (1.6)$$

де $\sum I_{\phi_i}^2$ – сума квадратів усіх значень струмів фідерів в контрольних точках, А².

Питомий опір 1 км тягової мережі постійного струму, Ом/км

$$r_0 = \frac{18,2}{S_i + \frac{S_{\text{ал}}}{1,7}} + \frac{2}{n \cdot G}, \quad (1.7)$$

де S – переріз проводів відповідної марки (м – мідних, ал – алюмінієвих), мм²; G – марка рейок (вага 1 м), кг; n – кількість рейкових ниток на ділянці (одноколійна $n = 2$, двоколійна $n = 4$).

Зміст звіту

1. Назва, мета та порядок виконання роботи.

2. Заповнена табл. 1.2 з приведенням основних числових розрахунків
3. Графіки всіх струмів фідерів $I_{\phi_i} = f(t)$ та напруги на струмоприймачеві електровозу $U_e = f(t)$ для кожної схеми живлення.
4. Епюри розподілу струмів та втрати напруги в контактній мережі $I_{k1}, I_{k2} = f(x)$, $U_{k1}, U_{k2} = f(x)$ згідно з п. 5 завдання.
5. Діаграма порівняння схем живлення за втратами потужності.
6. Ґрунтовні висновки з аналізом порівняння різних схем живлення.

Контрольні питання

1. Який вигляд має залежність струму фідера від струму поїзда для консольної схеми живлення?
2. У якому співвідношенні розділяється струм поїзда на струми фідерів для двосторонньої схеми живлення?
3. Яку частку струму поїзда становитиме струм фідера вузлової схеми живлення при симетричній схемі та розташування поїзда в середині ділянки?
4. Які призначення поста секціонування вузлової схеми живлення?
5. Для чого застосовують пункти паралельного з'єднання підвісок суміжних колій?
6. Який характер має залежність напруги на струмоприймачі електровозу при двосторонній схемі живлення та інших рівних умовах?
7. Для якої схеми живлення характерний найбільший рівень напруги?
8. Яка схема живлення і чому характеризується найбільшими втратами електроенергії?
9. Як перевірити правильність обчислення струмів фідерів для будь-якої схеми живлення?
10. В якому випадку втрати потужності для двосторонньої схеми живлення та одного поїзду при інших рівних умовах будуть меншими: для двоколійної чи одноколійної ділянки?
11. Які норми напруги та чим вони обумовлені для тягової мережі постійного струму?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

ДОСЛІДЖЕННЯ СХЕМ ЖИВЛЕННЯ КОНТАКТНОЇ МЕРЕЖІ ЗМІННОГО СТРУМУ

Мета: визначити закономірності розподілу струмів в контактній мережі при різних схемах живлення змінного струму; оцінити вплив схем живлення на величину напруги на струмоприймачеві електровозу; виконати техніко-економічне порівняння схем живлення на постійному та змінному струмах.

Короткі теоретичні відомості

Електричні розрахунки тягових мереж змінного струму істотно відрізняються від аналогічних на постійному струмі. Це обумовлено, головним чи-

ном, взаємним магнітним впливом усіх струмопровідних елементів тягової мережі. У випадку двоколіїних ділянок істотний вплив на спад напруги здійснюють навантаження сусідньої колії. На практиці застосовуються спрощені способи розрахунку, які засновані на припущенні відносно постійного опору 1 км тягової мережі двоколіїної ділянки незалежно від кількості і розташування поперечних з'єднувачів та розподілу навантажень між коліями.

Визначення параметрів проводів контактної підвіски при протіканні змінного струму можливе на основі використання власних і взаємних опорів цих проводів. Отримане Ф. Поллячеком і Дж. Карсоном рішення цієї задачі базується на припущенні, що нескінченно довгий провідник прокладений паралельно горизонтальній поверхні однорідної землі. Враховуючи реальні фактори, дослідниками встановлено, що формули Ф. Поллячека і Дж. Карсона можуть бути застосовані до розрахунку опору тягової мережі в частотному діапазоні до 5 кГц, при цьому похибка розрахунку не перевищить 5 %.

Повний власний опір проводу визначається формулою

$$\underline{z} = r_a + j\omega \left(L - \frac{\mu}{2} \cdot 10^{-4} \right), \quad (2.1)$$

де r_a – активний опір проводу, Ом/км (у випадку застосування мідних чи алюмінієвих проводів приймається рівним опору проводу постійному струму);

ω – кутова частота, с^{-1} ;

μ – магнітна проникність проводу (для мідних чи алюмінієвих $\mu = 1$);

L – індуктивність проводу, Гн/км.

В свою чергу, індуктивність нескінченно довгого проводу, розташованого на висоті h над поверхнею однорідної землі, можна обчислити за наближеною формулою

$$L \approx \left(2 \ln \frac{2}{\gamma |k| R} + 1 - j \frac{\pi}{2} - \frac{8 j k h}{3} \right) 10^{-4}, \quad (2.2)$$

де γ – постійна Ейлера ($\gamma = 1,7811$);

R – розрахунковий радіус проводу, см;

h – висота над поверхнею землі, см;

k – визначає глибину зони розтікання зворотного струму в землі, см.

Фізичний параметр, який характеризує електромагнітні властивості системи

$$k^2 = -4\pi j \omega \sigma,$$

де σ – питома провідність землі, од. СГС μ_0 ; (1 од. СГС $\mu_0 = 10^{11}$ См/м).

Приведені вище формули можуть бути спрощені та приведені до частоти 50 Гц, тобто

$$\underline{z} = r_a + 0,05 - j \cdot 0,144 \left[1,42 + \lg(R\sqrt{\sigma}) \right]. \quad (2.3)$$

Взаємний опір двох проводів

$$\underline{Z}_1 = j\omega M, \quad (2.4)$$

де M – взаємна індуктивність проводів, Гн/км.

Взаємна індуктивність між двома нескінченними проводами, розташованими над поверхнею землі, також наближено визначається за аналогічною формулою Ф. Поллячека

$$M \approx \left[2 \ln \frac{2}{\gamma |k| a} + 1 - j \frac{\pi}{2} - \frac{4jk}{3} (h_1 + h_2) \right] 10^{-4},$$

де a – відстань між проводами, см;

h_1, h_2 – висоти розташування проводів над поверхнею землі, см;

Аналогічно попередньому випадку формулу можна дещо спростити при застосуванні на частоті 50 Гц, а саме

$$\underline{Z}_M = 0,05 - j \cdot 0,144 (1,53 + \lg a \sqrt{\sigma}).$$

Для реальних умов експлуатації опір землі змінюється в достатньо широких межах – 30 ... 200 Ом·м. Проте в практиці розрахунків прийнято питомий опір землі вважати рівним $\rho = 100$ Ом·м, в цьому випадку максимальне відхилення модулю взаємного опору не перевищуватиме $\pm 7\%$, а максимальне відхилення комплексного кута буде менше $\pm 1\%$. Параметр a , у значенні відстані між несучим тросом і контактним проводом, прийнято приймати рівним 130 см.

Порядок виконання роботи

1. Визначити по табл. 2.1 згідно варіанту вихідні дані та ввести їх до програми імітаційного моделювання.

2. Для заданих схем живлення виконати моделювання руху одного поїзду по фідерній зоні заданої ділянки та отримати:

2.1. діючі значення струмів фідерів тягових підстанцій;

2.2. діюче значення величини напруги на струмоприймачеві електровозу;

3. За отриманими даними заповнити табл. 2.2 та побудувати графіки діючих величин струмів фідерів та напруги на струмоприймачеві електровозу.

4. За даними табл. 2.2 розрахувати витрати активної, реактивної та повної електроенергії на тягових підстанціях і питомі втрати електроенергії в тяговій мережі.

5. Для консольної схеми живлення побудувати векторну діаграму при знаходженні поїзду в координаті $4L/5$ ділянки, на якій вказати зафіксовані значення: 1) напруги на струмоприймачеві електровозу; 2) струму електровозу; 3) спад напруги та 4) втрату напруги в тяговій мережі, 5) напругу на шинях тягової підстанції.

6. Використовуючи дані розрахунків лабораторної роботи № 1, порівняти по питомим втратам електроенергії в тяговій мережі задані схеми живлення при на постійному та змінному струмах, аналітичний результат порівняння відзначити у висновку.

Таблиця 2.1

Вихідні дані

Варіант	Схеми живлення	Контактна мережа	Довжина ділянки L , км	Струм електровозу I_e , А	$\cos \varphi_e$	Швидкість руху, км/г
1	консольна, двостороння, вузлова	ПБСМ-70+МФ-100	60	100	0,65	60
2		ПБСМ-95+МФ-150		150	0,70	
3		М-95+МФ-100		200	0,75	
4		М-120+МФ-150		250	0,80	
5		М-150+МФ-100		300	0,85	

Примітки: напруги на шинах суміжних підстанцій приймаються рівними 27,5 кВ та не враховується їх внутрішній опір; пости секціонування для вузлових схем живлення розташовані посередині ділянки; крок рахунку 0,5 хв.; тип рейок – Р-65.

Таблиця 2.2

Результати моделювання

Схема живлення	Параметри	t , хВ										W_P , кВт·год W_Q , квар·год W_S , кВА·год	ΔW_P , кВт·год ΔW_Q , квар·год ΔW_S , кВА·год	ΔW_P , % ΔW_Q , % ΔW_S , %	
		0	6	12	18	24	30	36	42	48	54				60
Консольна	I_{ϕ} , А														
	U_e , В														
	ΔU , В														
Двостороння (роздільне живлення)	$I_{\phi 1}$, А														
	$I_{\phi 2}$, А														
	U_e , В														
	ΔU , В														
Вузлова	$I_{\phi 1}$, А														
	$I_{\phi 2}$, А														
	$I_{\phi 3}$, А														
	$I_{\phi 4}$, А														
	U_e , В														
	ΔU , В														

Основні формули для виконання розрахунків:

– витрати повної W_S , активної W_P та реактивної W_Q електроенергії на тягових підстанціях, кВт·год

$$W_S = \frac{1}{N} \cdot U_{\emptyset} \cdot T \cdot \sum I_{\hat{o}_i}, \quad (2.5)$$

$$W_P = W_S \cdot \cos \varphi_e, \quad (2.6)$$

$$W_Q = W_S \cdot \sin \varphi_e; \quad (2.7)$$

– втрати повної ΔW_S , активної ΔW_P та реактивної ΔW_Q електроенергії в тяговій мережі, кВт·год

$$\Delta W_S = W_S - \frac{1}{N} \cdot T \cdot \sum U_{e_i} \cdot I_{e_i}, \quad (2.8)$$

$$\Delta W_P = W_P - \Delta W_S \cdot \cos \varphi_e, \quad (2.9)$$

$$\Delta W_Q = W_Q - \Delta W_S \cdot \sin \varphi_e; \quad (2.10)$$

– відсотки втрат активної, реактивної та повної потужностей

$$\Delta W_P \% = \frac{\Delta W_P}{W_P} \cdot 100\%, \quad \Delta W_Q \% = \frac{\Delta W_Q}{W_Q} \cdot 100\%, \quad \Delta W_S \% = \frac{\Delta W_S}{W_S} \cdot 100\%.$$

Кількість розрахункових точок $N = 11$.

Питомий опір тягової мережі для побудови векторної діаграми $\underline{z_0} = r_0 + jx_0$ визначити за формулами Поллячека і порівняти з довідниковим або з програми імітаційного моделювання.

Зміст звіту

1. Назва, мета та порядок виконання роботи
2. Заповнена табл. 2.2 з приведенням числових розрахунків
3. Графіки струмів фідерів $I_{\phi i} = f(t)$ та напруги на струмоприймачеві електровозу $U_e = f(t)$ для кожної схеми живлення (6 графіків)
4. Векторна діаграма згідно п. 5 завдання.
5. Висновки за виконаною роботою.

Контрольні питання

1. В чому полягає складність визначення опору тягової мережі змінного струму?
2. Які переваги і недоліки живлення тягової мережі змінним струмом?
3. Як співвідносяться між собою активний та індуктивний опори тягової мережі змінному струму?
4. В якому випадку втрати електроенергії будуть меншими за інших рівних умов: при живленні тягової мережі постійним чи змінним струмом?
5. Як на прикладі векторної діаграми пояснити відмінність втрати і спаду напруги?

6. В чому полягає явище взаємоіндукції стосовно ділянок залізниць змінного струму?

7. Які норми напруги і чим вони викликані для тягової мережі змінного струму?

8. Чому на ділянках змінного струму застосовують нейтральні вставки у місці підключення тягових підстанцій до тягової мережі?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

ДОСЛІДЖЕННЯ СХЕМ ЖИВЛЕННЯ КОНТАКТНОЇ МЕРЕЖІ ПОСТІЙНОГО ТА ЗМІННОГО СТРУМУ ПРИ НАЯВНОСТІ ВИРІВНЮВАЛЬНИХ СТРУМІВ

Мета: визначити закономірності розподілу струмів в контактній мережі при різній по величині напрузі на шинах тягових підстанцій; оцінити вплив вирівнювальних струмів на величину напруги на струмоприймачеві електровозу; порівняти втрати електроенергії в тяговій мережі при наявності та відсутності вирівнювальних струмів.

Короткі теоретичні відомості

Напруга на шинах суміжних підстанцій коливається і ніколи не буває однаковою, а, отже, тяговою мережею будуть замикатись вирівнювальні струми.

На ділянках постійного струму при відсутності навантажень на лінії нерівність напруг на шинах суміжних підстанцій, зазвичай, не може викликати вирівнювальний струм. При появі ж навантаження на фідерній зоні, різниця між напругами суміжних підстанцій призводить до перерозподілу навантаження між підстанціями, що можна розглядати як результат накладання вирівнювального струму. Якщо на даній фідерній зоні між підстанціями A і B немає навантажень, а на суміжній, наприклад лівіше підстанції A , навантаження є, а правіше B немає, то на підстанції A напруга знизиться, і від підстанції B до підстанції A потече вирівнювальний струм, який через її шини піде до навантаження.

Нерівність напруги суміжних підстанцій на лініях постійного струму може бути використана (за допомогою пристроїв регулювання напруги) для примусового перерозподілу навантаження фідерної зони між підстанціями.

На лініях змінного струму вирівнювальні струми визначаються різницею напруг на підстанціях (по модулю і фазі) і повним опором тягової мережі. Ці струми можуть циркулювати тяговою мережею і при відсутності навантаження на даній фідерній зоні.

Неоднакові напруги на шинах тягових підстанцій можуть бути викликані розходженням напруги на вводах, коефіцієнтів трансформації, що виникають, наприклад, при регулюванні напруги на трансформаторі, а також різними втратами напруги в трансформаторах самих підстанцій. Якщо суміжні пі-

дстанції живляться від різних енергосистем, то різниця напруги на вводах може досягати великих значень. При живленні суміжних підстанцій від поздовжньої лінії передачі різниця напруг на суміжних підстанціях визначається падінням напруги в самій лінії передачі.

У деяких випадках вирівнювальні струми, або, що те ж саме, транзит потужності з тягової мережі, можуть привести до великих втрат енергії в ній і перевантаження підстанцій. Питання, пов'язані з протіканням вирівнювальних струмів на ділянках змінного струму, набагато складніші, ніж на лініях постійного струму. Зупинимось на них трохи докладніше.

Отже, напруга на суміжних підстанціях, що живлять одну і ту ж фідерну зону, може розрізнятися по модулю і фазі. У контурі, складеному з двох вторинних обмоток і тягової мережі, напруги цих двох підстанцій представляються векторами $\underline{U}_A$ і $\underline{U}_B$ (рис. 3.1).

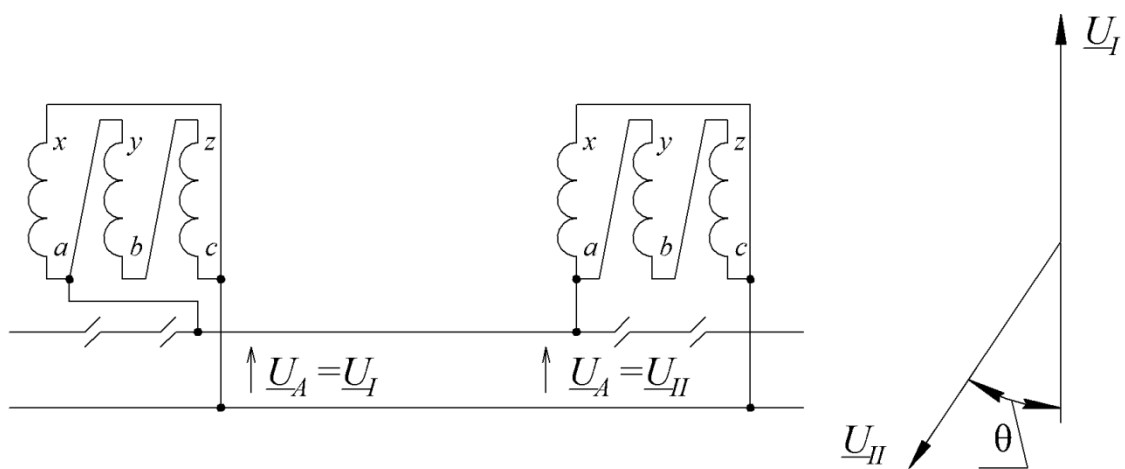


Рис. 3.1. Схема живлення тягової мережі двома тяговими підстанціями

Зручно розглянути окремо вплив нерівності модулів і кута θ між одним з векторів і продовженням іншого, подібно тому як це показано на рис. 3.2. При $\underline{U}_A > \underline{U}_B$ і $\theta = 0$ в контурі буде діяти е. р. с., рівна геометричній сумі напруг $\underline{U}_A$ і $\underline{U}_B$ тобто $\Delta \underline{U}_{AB} + \underline{U}_A + \underline{U}_B$ (рис. 3.2, а).

Ця е. р. с., майже збігається по фазі з напругою $\underline{U}_A$, викличе в контурі AB вирівнювальний струм. Так як у контурі переважає в основному індуктивний опір, то вектор вирівнювального струму буде відставати від вектора $\Delta \underline{U}_{AB}$ на кут, близький до 90° . Іншими словами, нерівність по модулю напруги суміжних підстанцій, а отже, і регулювання напруги на них призводить до появи в основному реактивного струму, тобто при цьому відбувається перерозподіл реактивної потужності. В даному випадку підстанція A додатково навантажується струмом $I_{\text{вир}}$, так як він від $\underline{U}_A$ відстає, і підстанція A сприймає підстанцію B як додаткове індуктивне навантаження. Навпаки, струм $I_{\text{вир}}$ сприймається підстанцією B як ємнісний, він випереджає напругу $\underline{U}_B$ майже на 90° і для підстанції B підстанція A є ніби ємнісним навантаженням. В результаті підстанція B розвантажується від реактивного навантаження.

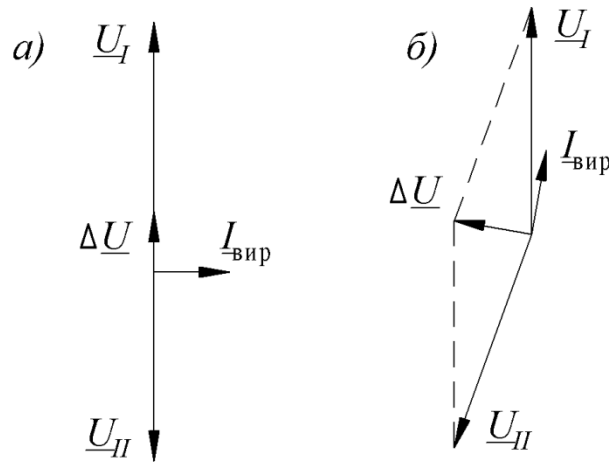


Рис. 3.2. Векторні діаграми виникнення вирівнювальних струмів

Поворот одного вектора відносно іншого (рис. 3.2, б) на кут θ дає сумарну е.р.с., рівну $\Delta \underline{U}_{AB}$ (геометрична сума векторів $\underline{U}_A$ і $\underline{U}_B$). У даному випадку напруга $\underline{U}_B$ відстає від $\underline{U}_A$ на кут 180° . Це, наприклад, може бути, якщо джерело живлення лежить лівіше підстанції A (рис. 3.1), тоді внаслідок падіння напруги в лінії передачі від підстанції A до B напруга $\underline{U}_B$ буде трохи відставати від напруги $\underline{U}_A$. Тепер е.р.с. $\Delta \underline{U}_{AB}$ випереджає напругу $\underline{U}_A$ на кут, близький до 90° . І знову, як і вище, вирівнювальний струм $I_{\text{вир}}$ відставатиме від $\Delta \underline{U}_{AB}$ також на кут, близький до 90° , тобто буде спрямований майже по вектору $\underline{U}_A$ і протилежний вектору $\underline{U}_B$.

Отже, поворот вектора $\underline{U}_B$ на малий кут θ призведе тепер уже до активного вирівнювального струму.

Якщо ж вектор $\underline{U}_B$ менше по модулю вектора $\underline{U}_A$ і повернутий на кут θ , то у вирівнювальному струмі є реактивна і активна складові. Кут θ зазвичай невеликий, і тому у вирівнювальному струмі переважає в основному реактивна складова.

Таким чином, очевидні переваги двосторонніх схем живлення у порівнянні з односторонніми стосовно втрат напруги та потужності, істотно залежать від рівня напруги на суміжних тягових підстанціях. В загальному випадку при нерівності напруги величина вирівнювального струму визначається виразом

$$I_{\text{вир}} = \frac{\Delta \underline{U}}{z_0 \cdot L}, \quad (3.1)$$

де $\Delta \underline{U}$ – різниця напруги суміжних підстанцій, В;

$z_0 \cdot L$ – опір тягової мережі міжпідстанційної зони, Ом.

Порядок виконання роботи

1. Визначити відповідно до табл. 3.1 згідно варіанту вихідні дані та увести їх до програми імітаційного моделювання.

2. Виконати моделювання руху одного поїзду при різних величинах напруги на шинах суміжних тягових підстанцій для двосторонньої роздільної схеми живлення на постійному та змінному струмі.

3. Результати занести до табл. 3.2.

Таблиця 3.1

Вихідні дані

Варіант	Схема живлення	Контактна мережа	Струм електро- возу I_e , А	Напруги на тягових підстанціях, кВ
1	двостороння постійного струму	М-120+МФ-150	1000	3,4 / 2,9
2		М-95+2МФ-100	1200	3,5 / 3,0
3		М-95+2МФ-150	1400	2,9 / 3,4
4		М-120+2МФ-100	1600	3,0 / 3,5
5		М-120+2МФ-150	1800	2,8 / 3,3
1	двостороння змінного струму	ПБСМ-70+МФ-100	100 / 0,65	24 / 29
2		ПБСМ-95+МФ-150	150 / 0,70	23 / 28
3		М-95+МФ-100	200 / 0,75	29 / 24
4		М-120+МФ-150	250 / 0,80	28 / 23
5		М-150+МФ-100	300 / 0,85	27 / 22

Примітки: внутрішній опір тягових підстанцій не враховувати; крок рахунку 0,5 хв.; тип рейкової мережі – Р-65.

4. Побудувати графіки струмів фідерів та напруги на струмоприймачеві електровозу для двох схем живлення.

5. Визначити мінімальні значення напруги на струмоприймачеві електровозу та порівняти з відповідними значеннями, отриманими в лабораторних роботах № 1, 2.

Таблиця 3.2

Результати моделювання

Схема	Параме-три	t , хВ									W , кВт·год	ΔW , кВт·год	ΔW , %
		0	3	6	9	12	15	18	21	24			
Двостороння постійного струму	$I_{\phi 1}$, А												
	$I_{\phi 2}$, А												
	$I_{\phi 3}$, А												
	$I_{\phi 4}$, А												
	$U_{\text{е}}$, В												
	ΔU , В												

Продовження табл. 3.2

		t , хв											W_S , кВА·год	ΔW_S , кВА·год	ΔW_S , %
		0	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60			
Двостороння змінного струму	$I_{\phi 1}$, А														
	$I_{\phi 2}$, А														
	$I_{\phi 3}$, А														
	$I_{\phi 4}$, А														
	U_e , В														
	ΔU , В														

Зміст звіту

1. Назва, мета та порядок виконання роботи;
2. Заповнена табл. 3.2. з приведенням необхідних розрахунків;
3. Графіки струмів фідерів $I_{\phi i} = f(t)$ та напруги на струмоприймачеві електровозу $U_e = f(t)$ для двох схем живлення;
4. Гістограма порівняння втрат електроенергії в тяговій мережі за родом струму та режимами напруги;
5. Висновки за виконаною роботою.

Контрольні питання

1. Які недоліки виникнення вирівнювальних струмів в тяговій мережі?
2. Чи будуть виникати вирівнювальні струми в системі постійного струму за різних напруг і відсутності тягового навантаження?
3. У якому випадку при двосторонньому живленні вирівнювальний струм буде більшим: для одноколіїної чи двоколіїної ділянки?
4. Який характер вирівнювального струму матиме місце на змінному струмі у випадку різниці напруги за кутом зсуву фаз?
5. Які схеми живлення тягової мережі унеможливають протікання вирівнювальних струмів?
6. Як перерозподіляється навантаження між підстанціями при виникненні вирівнювальних струмів?
7. Які існують способи уникнення і зменшення вирівнювальних струмів?

ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ СТРУМІВ В ТЯГОВОМУ ТРАНСФОРМАТОРІ В РІЗНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ

Мета: з'ясувати закономірність розподілення струмів у обмотках тягового трансформатора, визначити відстаючу та випереджаючу фази, оцінити несиметрію струмів у живлячій лінії, яка створюється тяговим навантаженням.

Короткі теоретичні відомості

На залізницях, електрифікованих системою однофазного змінного струму промислової частоти, отримало поширення застосування трифазних трансформаторів зі схемою з'єднання $Y/\Delta - 11$ гр. для живлення тягової мережі.

Одним з недоліків застосування вказаної схеми є виникнення несиметрії струмів у живлячих лініях електропостачання, які викликаються різним співвідношенням струмів у обмотках тягових трансформаторів та плечах живлення тягових підстанцій. У даному випадку виявляються неоднаковими за величиною як модулі струмів, так і кути зсуву між струмами і відповідними напругами. При цьому, з двох фаз, які живлять плечі тягових навантажень, та фаза, яка має менший кут зсуву фаз між струмом і напругою, називається «випереджаючою», а друга – «відстаючою». Ця обставина досить істотно впливає на втрати напруги в трансформаторі.

Для оцінки впливу несиметрії тягових струмів на несиметрію, що створюється у живлячих лініях електропостачання, необхідно визначати коефіцієнт несиметрії струмів K_{2I} , яким називається відношення модулю струму зворотної послідовності $I_{(2)}$ до модулю струму прямої послідовності $I_{(1)}$, тобто

$$K_{2I} = \frac{I_{(2)}}{I_{(1)}} \cdot 100 \%. \quad (4.1)$$

Безпосередньо для схеми з'єднання тягового трансформатора $Y/\Delta - 11$ гр. коефіцієнт несиметрії можна визначити за формулою

$$K_{2I} = \frac{\sqrt{n^2 - n + 1}}{n + 1} \cdot 100, \quad (4.2)$$

де $n = I_{\text{в}} / I_{\text{в}}'$ – співвідношення струмів плечей живлення.

Як відомо, несиметрична система векторів трифазного кола, розкладається на три симетричних системи, які називаються прямою, зворотною та нульовою послідовностями. Оскільки для прийнятої схеми живлення тягової мережі нейтраль зовнішньої системи електропостачання і нульова точка тягового трансформатора не з'єднуються, то нульова послідовність у нашому випадку відсутня. У зв'язку з цим, величини струмів прямої і зворотної послідовності можна визначити одним з графічних методів.

Нехай задано трифазну систему векторів струмів (рис. 4.1). Необхідно з'єднати кінці двох векторів струму (наприклад, $\underline{I}_A$ та $\underline{I}_C$) відрізком прямої AC . На отриманому відрізку AC , як на основі, побудувати два рівносторонніх трикутники ANC і AMC . З'єднавши точки M та N і, поділивши відрізок прямої MN на три рівні частини, отримаємо вектор струму прямої послідовності для фази «B». Аналогічним чином визначається вектор струму прямої послідовності тільки на відрізку NB .

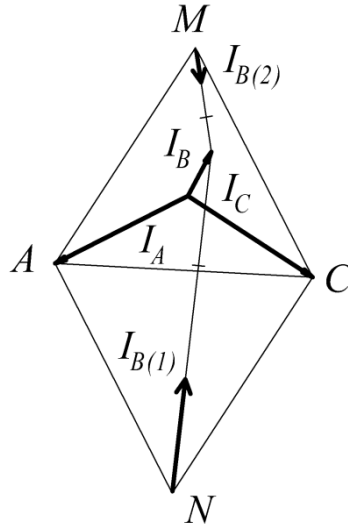


Рис. 4.1. Графічний метод визначення струмів прямої та зворотної послідовності

Струми в обмотках трансформатора визначається системою рівнянь, яка досить просто витікає з прийнятого правила знаків та принципу розділення струму між двома паралельними вітками. Застосовуючи принцип накладання розглянемо розділення струмів в трансформаторі тягової підстанції змінного струму окремо від лівого та правого плеча (рис. 4.2).

Так, струм лівого плеча замикається через два контури: перший визначається опором робочої обмотки ax , другий – опором двох послідовно з'єднаних обмоток by та cz . Отже, через контур з меншим опором замикатиметься $2/3$ струму лівого плеча, через контур з більшим – $1/3$ струму цього ж плеча. Напрямок частки струму лівого плеча співпадає з прийнятим додатнім напрямком для обмотки ax , і не співпадає для двох інших, отже у системі рівнянь (4.3) маємо відповідні знаки для часток струмів лівого плеча: «+» для фази a і «-» для фаз b і c . Аналогічним чином визначаються і частки струмів правого плеча у системі (4.3). Матимемо основну робочу обмотку cz , якою з від'ємним знаком замикатиметься $2/3$ струму правого плеча, і дві інші з'єднані послідовно обмотки ax і by , якими замикатиметься $1/3$ струму правого плеча з додатнім знаком.

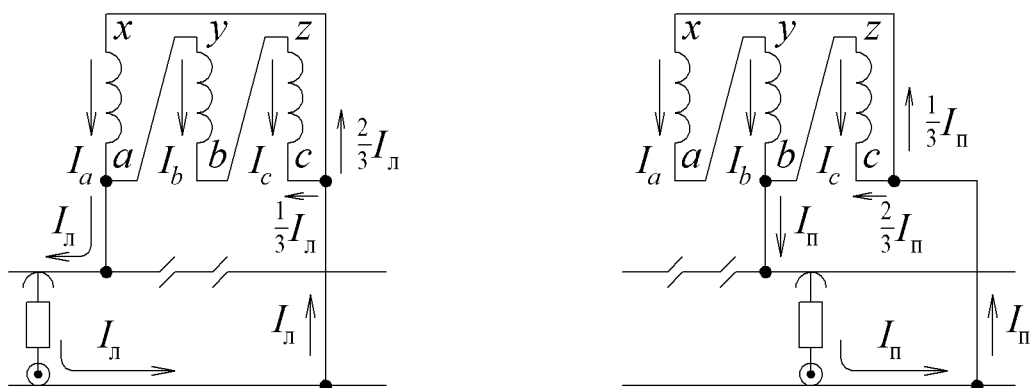


Рис. 4.2. Визначення розподілу струмів у обмотках трансформатора методом накладання

Остаточно система рівнянь має наступний вигляд

$$\begin{aligned} I_a &= \frac{2}{3} \cdot I_{\text{Л}} + \frac{1}{3} \cdot I_{\text{П}}; \\ I_b &= -\frac{1}{3} \cdot I_{\text{Л}} + \frac{1}{3} \cdot I_{\text{П}}; \\ I_c &= -\frac{1}{3} \cdot I_{\text{Л}} - \frac{2}{3} \cdot I_{\text{П}}. \end{aligned} \quad (4.3)$$

Порядок виконання роботи

1. Зібрати схему підключення трансформатора до тягової мережі (рис. 4.3) згідно з номером варіанту. Вимірювальні прилади підключити для контролю величини струму в плечах живлення, в обмотках низької напруги трансформатора та кутів навантаження в плечах живлення (рис. 4.4).

2. Виконати вимірювання для наступних режимів роботи: навантажене ліве плече живлення; навантажене праве плече живлення; навантажені обидва плеча; компенсація реактивної потужності по чергово в кожному з плечей. За даними вимірювання заповнити табл. 4.2.

3. За даними вимірювань струмів у плечах живлення виконати аналітичний розрахунок струмів в обмотках трансформатора та побудувати векторну діаграму для кожного режиму.

4. За спрощеною формулою, використовуючи співвідношення струмів в плечах живлення, визначити коефіцієнт несиметрії струмів за зворотною послідовністю та зробити висновок за якого режиму він набуває найменших значень.

Таблиця 4.1

Вихідні дані для збирання схеми

№ варіанту		1	2	3	4	5
Група з'єднання обмоток		1 гр.	11 гр.	1 гр.	11 гр.	1 гр.
Підключення до живлячої мережі		<i>ABC</i>	<i>CAB</i>	<i>BCA</i>	<i>ACB</i>	<i>BAC</i>
Підключення до тягової мережі	Л	<i>a</i>	<i>c</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>b</i>
	П	<i>b</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>a</i>
	Р	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
Струм лівого плеча Іл, А		8	6	7	8	9
Струм правого плеча Іп, А		2	9	5	6	7

Таблиця 4.2

Результати вимірювань

Параметри	Режими				
	навантажене ліве плече	навантажене праве плече	навантажені обидва плеча	компенсація в лівому плечі	компенсація в правому плечі
$I_{\dot{E}}, \text{A}$					
$I_{\dot{I}}, \text{A}$					
I_a, A					
I_b, A					
I_c, A					
$\varphi_{\dot{E}}, ^\circ \text{ ел.}$					
$\varphi_{\dot{I}}, ^\circ \text{ ел.}$					
$n = I_{\dot{E}} / I_{\dot{I}}$					
$K_{2I}, \%$					

Зміст звіту

1. Назва, мета та порядок виконання роботи, схема вимірювань рис. 4.3.
2. Заповнена табл. 4.2 за результатами вимірювань і розрахунків.
3. Система рівнянь для визначення струмів в обмотках трансформатора для заданої групи та схеми з'єднання обмоток.
4. Векторні діаграми для кожного режиму навантаження з позначенням струмів плечей живлення та в обмотках трансформатора у масштабі.
5. Осцилограми струмів в залежності від режиму роботи компенсації (без компенсації, ступінчата компенсація, плавна компенсація).
6. Висновки за виконаною роботою.

Контрольні питання

1. Які схеми з'єднання обмоток трансформатора використовуються для живлення тягової мережі змінного струму?

2. Чому виникає несиметрія у живлячих тягові підстанції змінного струму лініях електропостачання?
3. Які існують заходи щодо зменшення несиметрії тягових підстанцій змінного струму?
4. Як визначити «випереджаючу» та «відстаючу» фази?
5. Як визначити коефіцієнт несиметрії струмів?
6. За яким принципом розділяються струми плечей живлення в обмотках трансформатора?
7. Як впливає режим роботи компенсуючого пристрою на енергетичні показники системи тягового електропостачання?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

ВИЗНАЧЕННЯ ПОТУЖНОСТІ КОМПЕНСУЮЧОГО ПРИСТРОЮ НА ТЯГОВІЙ ПІДСТАНЦІЇ ЗМІННОГО СТРУМУ

Мета: дослідити вплив потужності компенсуючого пристрою на споживання реактивної електроенергії тяговою підстанцією змінного струму застосовуючи моделювання імовірнісного графіку руху поїздів; використовуючи отримані статистичні дані, визначити оптимальну потужність компенсуючого пристрою.

Короткі теоретичні відомості

На ділянках залізниць, електрифікованих змінним струмом, зазвичай споживання реактивної потужності співвимірне з споживанням активної. В деяких випадках, за наявності вирівнювальних струмів може мати місце також відносне перевищення величини реактивної електроенергії над активною. У зв'язку з цим, на вводи тягових підстанцій мають відносно низький коефіцієнт потужності ($\lambda = 0,7 \dots 0,85$).

Реактивна потужність характеризує енергію, що коливається між в електричним колом і джерелом, разом з чим додатково завантажує елементи системи електропостачання. В результаті збільшуються втрати активної електроенергії і напруги, зменшується встановлена потужність відповідних пристроїв.

З метою підвищення ефективності роботи електричної тяги виникає необхідність у використанні конденсаторних батарей для компенсації реактивної потужності. Пристрої поперечної компенсації, що вмикаються паралельно навантаженню, дозволяють підвищити коефіцієнт потужності, збільшити рівень напруги в контактній мережі і, в деяких випадках, знизити коефіцієнт несиметрії струмів тягової підстанції.

Потужність компенсуючого пристрою і спосіб його підключення (на підстанції чи посту секціонування) визначається на підставі техніко-економічного розрахунку.

В умовах лабораторної роботи потужність компенсуючого пристрою для будь-якого навантаження можна розрахувати за формулою

$$Q_C = P(\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2), \quad (5.1)$$

де P – середня активна потужність навантаження, кВт;

φ_1 – кут навантаження до застосування компенсації, ° ел.;

φ_2 – кут навантаження, якого необхідно досягти, ° ел.

Відповідно до діючої методики розрахунку плати за перетікання реактивної електроенергії [4] встановлюється нормативний коефіцієнт реактивної потужності $\operatorname{tg}\varphi = 0,25$.

За відомим значенням потужності компенсуючого пристрою $Q_{\hat{E}}$ визначаються параметри конденсаторної батареї з огляду на номінальну напругу та допустимий струм навантаження косинусних конденсаторів.

Кількість послідовно включених конденсаторів для можливості включення на більш високу напругу визначається формулою

$$N = a \cdot \frac{27,5}{U_K}, \quad (5.2)$$

де a – коефіцієнт, що враховує втрати у реакторі та несинусоїдність прикладеної напруги;

U_K – номінальна напруга конденсатора, кВ.

Кількість віток паралельно включених конденсаторів для збільшення навантажувальної здатності за допустимим струмом визначається як

$$M = \frac{Q_C}{Q_K \cdot N}, \quad (5.3)$$

де Q_K – паспортна потужність конденсатора, квар;

Q_C – необхідна реактивна потужність пристрою, квар.

У випадку несиметричного навантаження коефіцієнт потужності на вводах тягової підстанції визначається за формулою

$$\lambda = \frac{U_A I_A \cos \varphi_A + U_B I_B \cos \varphi_B + U_C I_C \cos \varphi_C}{U_A I_A + U_B I_B + U_C I_C}. \quad (5.4)$$

З метою підвищення напруги на струмоприймачі електровозу можуть застосовуватись пристрої поздовжньої компенсації. Оскільки зниження напруги в контактній мережі відбувається за рахунок втрат напруги в основному на індуктивному опорі трансформаторів і мережі, то включення послідовно з навантаженням ємності призводить до зменшення результуючого реактивного опору, і, як наслідок, до збільшення напруги на струмоприймачі.

Пристрій поздовжньої компенсації можна включити у живлячий фідер «відстаючої» чи «випереджаючої» фази, у заземлений вивід трансформатору (відсос), а також в контактну мережу на перегоні. При цьому, у кожному випадку вплив поздовжньої компенсації на режим напруги в контактній мережі буде різним.

До переваг регулювання напруги в контактній мережі з допомогою поздовжньої компенсації слід віднести: безінерційність, автоматичність і безконтактність.

Ступінь компенсації втрат напруги залежність від величини ємності пристрою поздовжньої компенсації. При включенні поздовжньої компенсації у живлячий фідер ємність пристрою визначають виходячи з бажаного збільшення напруги в контактній мережі за формулою

$$C_{\text{пз}} = \frac{I \cdot \sin \varphi}{\omega \cdot \Delta U}, \quad (5.5)$$

де I – розрахункове значення струму живлячого фідера, А;

φ – кут зсуву струму відносно вектору напруги у живлячому фідері, ° ел.;

ΔU – бажане збільшення напруги, В;

ω – кутова частота, с⁻¹.

У випадку підключення поздовжньою компенсації у заземлений вивід трансформатору, ємність визначають виходячи з рівності

$$X_{\text{пз}} = \frac{1}{3} X_{\text{п/ст}}, \quad (5.6)$$

де $X_{\text{пз}}$ – опір пристрою поздовжньої компенсації, Ом;

$X_{\text{п/ст}}$ – еквівалентний приведений опір тягової підстанції, Ом.

Виходячи з цього ємність пристрою поздовжньої компенсації

$$C_{\text{пз}} = \frac{3}{\omega \cdot X_{\text{п/ст}}}. \quad (5.7)$$

Порядок виконання роботи

1. Визначити за табл. 5.1 згідно варіанту вихідні дані та сформувати імовірнісний графік руху поїздів (ГРП) в програмі імітаційного моделювання.

2. При введенні вихідних розкид мінімальних та максимальних значень швидкості та струму навантаження відносно заданих прийняти рівним $\pm 10 \%$.

Таблиця 5.1

Вихідні дані

Варіант	Параметри умовних типів поїздів															
	Вантажний				Швидкісний				Електропоїзд				Пасажи́рський			
	N, пар	V _{сер} , км/год	I _{сер} , А	cosφ	N, пар	V _{сер} , км/год	I _{сер} , А	cosφ	N, пар	V _{сер} , км/год	I _{сер} , А	cosφ	N, пар	V _{сер} , км/год	I _{сер} , А	cosφ
1	5	55	200	0,75	2	120	250	0,85	5	80	100	0,8	5	90	150	0,85
2	6	60	210		2	130	255		6	70	120		4	95	160	
3	7	65	220		1	140	260		7	75	130		3	100	170	
4	8	70	230		1	150	265		8	85	110		2	95	160	
5	9	75	240		1	160	270		9	70	140		1	90	150	

Примітки: схема живлення – двостороння з роздільною роботою колій; крок рахунку – 0,5 хв; марка тягової мережі – ПБСМ-95 + МФ-100 + Р-65; довжина ділянки – 50 км; напруги на шинах суміжних підстанцій 27,5 кВ; мінімальний міжпоїзний інтервал – 10 хв; розрахунковий період – 6 год;

3. Виконати моделювання сформованого ГРП без пристроїв компенсації реактивної потужності та зафіксувати споживання активної W_P , реактивної W_Q та повної W_S електроенергії в табл. 5.2.

4. Послідовно змінюючи струм компенсуючого пристрою, досягти нормованого коефіцієнту реактивної потужності ($\text{tg}\varphi = 0,25$).

5. Визначити струм компенсуючого пристрою, при якому досягається максимальне зниження споживання реактивної електроенергії тяговою підстанцією без перекомпенсації.

6. Розрахувати параметри компенсуючого пристрою.

Таблиця 5.2

Результати моделювання

№ пор	I_{KY} , А	Q_{KY} , квар	W_P , тис. кВт·год	W_Q , тис. квар·год	W_S , тис. кВА·год	$\cos\varphi$	$\text{tg}\varphi$
1							
2							
3							
4							
5							
6							
...							

Основні формули для виконання розрахунків:

$$\text{— коефіцієнт реактивної потужності } \cos\varphi = \frac{W_P}{W_S} = \frac{W_P}{\sqrt{W_P^2 + W_Q^2}}, \text{ tg}\varphi = \frac{W_Q}{W_P};$$

$$\text{— потужність компенсуючого пристрою } Q_{KY} = U_{\text{ш}} I_{KY}, \text{ квар};$$

$$\text{— сумарна ємність компенсуючого пристрою } C_{\Sigma} = \frac{Q_{KY}}{\omega U_{\text{ш}}^2} = \frac{I_{KY}^2}{\omega Q_{KY}}, \text{ Ф};$$

де ω – кутова частота, 1/с; $\omega = 2\pi f$, f – промислова частота 50 Гц;

$U_{\text{ш}}$ – напруга на шинах тягової підстанції, кВ;

I_{KY} – струм компенсуючого пристрою, А.

Зміст звіту

1. Назва, мета та порядок виконання роботи.
2. Вихідні дані та сформований графік руху поїздів.
3. Заповнена табл. 4.2. з приведенням необхідних розрахунків

4. Графіки залежностей споживання реактивної електроенергії від струму компенсуючого пристрою $W_Q = f(I_{KY})$ та коефіцієнта реактивної потужності від потужності компенсуючого пристрою $\text{tg}\varphi = f(Q_{KY})$.

5. Висновки за виконаною роботою з аналізом потужності компенсуючого пристрою.

Контрольні питання

1. Що характеризує поняття реактивної потужності?
2. На що впливає наявність реактивної потужності в системі тягового електропостачання?
3. Які існують різновиди компенсуючих пристроїв для системи електричної тяги змінного струму?
4. На підставі чого визначається потужність та розташування компенсуючих пристроїв?
5. Яке основне призначення пристроїв поздовжньої та поперечної компенсації реактивної потужності?
6. Для чого використовують послідовне та паралельне з'єднання конденсаторів при побудові батарей компенсуючих пристроїв?
7. Яке призначення реактора на тягових підстанціях змінного струму?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6

ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСИМЕТРІЇ НАВАНТАЖЕННЯ ТЯГОВОЇ ПІДСТАНЦІЇ ЗМІННОГО СТРУМУ

Мета: дослідити величину несиметрії навантаження тягової підстанції змінного струму на основі моделювання імовірнісного графіку руху поїздів; використовуючи отримані статистичні дані, визначити значення величини коефіцієнта несиметрії напруги за зворотною послідовністю, що відповідає інтегральній імовірності 95 %.

Короткі теоретичні відомості

При застосуванні на тягових підстанціях змінного струму тристрижневих трансформаторів живлення тягового навантаження здійснюється напругою 27,5 кВ від обмоток, з'єднаних за схемою трикутника. При цьому від кожної тягової підстанції живляться дві фідерні зони, які приєднуються до двох вершин трикутника, третя вершина приєднується до рейкової мережі. З формули визначення коефіцієнта несиметрії струмів (4.2) випливає, що несиметрія первинних струмів для даної схеми підключення, змінюється в межах від 50 до 100 %, при чому мінімальне значення має місце за умови рівності струмів навантаження в плечах живлення.

В якості «корисної» потужності трансформатора за наявності несиметрії розуміється потужність, яка відповідає струму прямої послідовності. Потужність трансформатора, яка відповідає струму прямої послідовності при такому навантаженні, коли в одній з фаз (обмоток) струм сягає номінального зна-

чення, прийнято називати тією, що є у розпорядженні. Відношення цих потужностей характеризує ступінь використання трансформатора. Розрахунки з певними припущеннями показують, що в середньому потужність трансформатора для граничних умов несиметрії складає величину $(0,5...0,76)S_{\text{н}}$.

Для зниження несиметрії традиційно застосовується різне підключення фаз трансформаторів тягових підстанцій до фаз ліній зовнішнього електропостачання із забезпеченням умови паралельної роботи. Проте такий спосіб симетрування виявляється недостатнім, особливо для живлячих електроенергетичних систем з потужністю короткого замикання менше $1000 \text{ МВ} \cdot \text{А}$. Однією з причин низької ефективності традиційного способу симетрування є наявність окремих міжпідстанційних зон, енергоспоживання яких різко відрізняється від суміжних. Інша причина пов'язана з нерівномірністю руху поїздів, особливо підвищеної ваги, внаслідок чого навантаження всіх тягових підстанцій, що утворюють «гвинт», відносно рідко бувають співмірними за величиною.

Приведені обставини призводять до збільшення одного з важливих показників якості електроенергії у живлячих енергосистемах та розгалужених мережах електропостачання, які взаємодіють з тяговими підстанціями, – несиметрії напруги за зворотною послідовністю.

Кількісно несиметрія напруги характеризується коефіцієнтами несиметрії напруги за зворотною K_{2U} та нульовою K_{0U} послідовностями. Нормально допустиме та гранично допустиме значення коефіцієнта несиметрії напруги за зворотною послідовністю в точках загального приєднання до електричних мереж дорівнює 2,0 і 4,0 % відповідно.

Якість електричної енергії за коефіцієнтом несиметрії напруги за зворотною послідовністю в точках загального приєднання вважають такою, що відповідає вимогам стандарту [5], якщо найбільше з усіх виміряних протягом 24 год значень коефіцієнтів несиметрії не перевищує гранично допустимого значення, а значення коефіцієнта несиметрії напруги, яке відповідає імовірності 95 % за встановлений період часу, не перевищує нормально допустимого значення.

Порядок виконання роботи

1. Сформувані імовірнісний графік руху поїздів в програмі імітаційного моделювання згідно варіанту та вихідних даних лабораторної роботи № 5 з періодом розрахунку 24 год.

2. До табл. 6.1 занести результати розрахунку графіку руху поїздів.

3. За отриманими даними розрахувати значення коефіцієнта несиметрії струмів тягової підстанції за зворотною послідовністю K_{2I} .

4. Використовуючи емпіричну залежність за відомим значенням K_{2I} визначити коефіцієнт несиметрії напруги K_{2U}

5. Побудувати залежність коефіцієнта несиметрії струмів за зворотною послідовністю від співвідношення струмів плечей живлення тягової підстанції $K_{2I} = f(n)$, $n = I_{Л}/I_{П}$.

6. Виконати статистичну обробку результатів за табл. 6.2.

7. Побудувати розподіл ймовірностей $p = f(K_{2U})$ та функцію інтегральних ймовірностей $P = f(K_{2U})$.

8. Визначити значення K_{2U} , що відповідає інтегральній імовірності 95 %.

Таблиця 6.1

Результати моделювання та розрахунків

№ пор.	t , хв	$I_{Ф1}$, А	$I_{Ф2}$, А	$I_{Л}$, А	$I_{Ф3}$, А	$I_{Ф4}$, А	$I_{П}$, А	K_{2I} , %	K_{2U} , %
1	0								
2	60								
3	120								
4	180								
5	240								
6	300								
7	360								
8	420								
9	480								
10	540								
11	600								
12	660								
13	720								
14	780								
15	840								
16	900								
17	960								
18	1020								
19	1080								
20	1140								
21	1200								
22	1260								
23	1320								
24	1380								
25	1440								

Статистична обробка результатів

№ пор	Межі K_{2U} , %	Частота n	Імовірність p , %	Інтегральна імовірність P , %
1	0 – 0,5			0
2	0,5 – 1,0			
3	1,0 – 1,5			
4	1,5 – 2,0			
5	2,0 – 2,5			
6	2,5 – 3,0			
7	3,0 – 3,5			
8	3,5 – 4,0			
...	4,0 – ...			100
Сума		Σn_i	100	–

Основні формули для виконання розрахунків:

– коефіцієнт несиметрії струмів за зворотною послідовністю для схеми

з'єднання «зірка – трикутник» $K_{2I} = \frac{\sqrt{n^2 - n + 1}}{n + 1} \cdot 100$, $n = \frac{I_{\text{Л}}}{I_{\text{П}}}$;

– емпірична залежність коефіцієнта несиметрії напруги від коефіцієнта несиметрії струмів $K_{2U} = 0,815 \cdot K_{2I}^{0,249}$;

– струми плечей живлення $I_{\text{Л}} = I_{\text{Ф1}} + I_{\text{Ф2}}$, $I_{\text{П}} = I_{\text{Ф3}} + I_{\text{Ф4}}$;

– імовірність $p_i = \frac{n_i}{\Sigma n_i} \cdot 100\%$;

– інтегральна імовірність $P_i = P_{i-1} + p_i$.

Приклад побудови гістограми розподілу та інтегральної функції ймовірностей приведений на рис. 5.1.

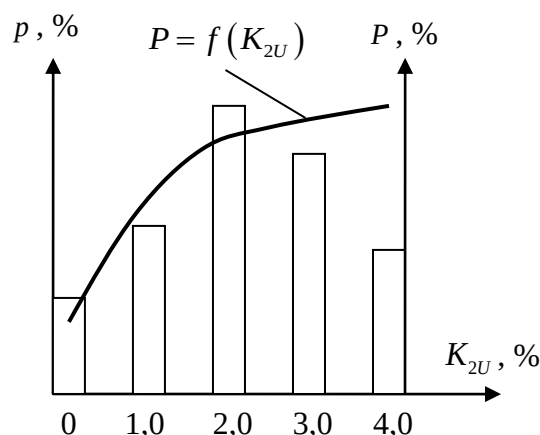


Рис. 5.1. Гістограма розподілу значень K_{2U} та функція інтегральних ймовірностей

Зміст звіту

1. Назва, мета та порядок виконання роботи.
2. Вихідні дані та результати моделювання (табл. 6.1).
3. Залежність $K_{2I} = f(n)$, $n = I_{\text{Л}}/I_{\text{П}}$.
4. Статистична обробка результатів моделювання (табл. 6.2).
5. Гістограма розподілу ймовірностей $p = f(K_{2U})$, функція інтегральних ймовірностей $P = f(K_{2U})$, визначене значення K_{2U} , що відповідає інтегральній ймовірності 95 %.
6. Висновки за виконаною роботою.

Контрольні питання

1. Чому для тягових підстанцій саме змінного струму характерна несиметрія струмів та напруги?
2. В яких межах змінюється коефіцієнт несиметрії струмів для традиційної схеми підключення?
3. Як змінюється «корисна» потужність трансформатора тягової підстанції за наявності несиметрії струмів?
4. Які відомі способи зниження несиметрії струмів в системі електричної тяги змінного струму?
5. З яких причин підключення тягових підстанцій за схемою «гвинта» має низьку ефективність симетрування?
6. Яким чином нормується несиметрія напруги в системах електропостачання?
7. Як встановити відповідність вимог до якості електричної енергії стосовно несиметрії напруги?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7

ДОСЛІДЖЕННЯ ГАРМОНІЙНИХ СПОТВОРЕНЬ ТЯГОВОЇ ПІДСТАНЦІЇ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Мета: експериментальним шляхом виміряти напругу на виході трифазного випрямляча у симетричному та несиметричному режимах; проаналізувати спектр випрямленої напруги, розрахувати кількісні показники у різних режимах роботи.

Короткі теоретичні відомості

При застосуванні на тягових підстанціях випрямних агрегатів крива випрямленої напруги виходить пульсуючою, для випадку шестифазного випрямлення крива показана суцільною лінією на рис. 7.1. На протязі інтервалу t' проводять одночасно два аноди вентилів і напруга випрямленого струму дорівнює середній арифметичній величині миттєвих значень напруги анодів, які одночасно знаходяться у провідному стані. Періодичність пульсації випрямленої напруги жорстко пов'язана з частотою живлячої мережі. Так, для 6-пульсного випрямлення основна частота змінної складової випрямленої напруги $6 \cdot 50 = 300$ Гц, а для 12-пульсного – 600 Гц.

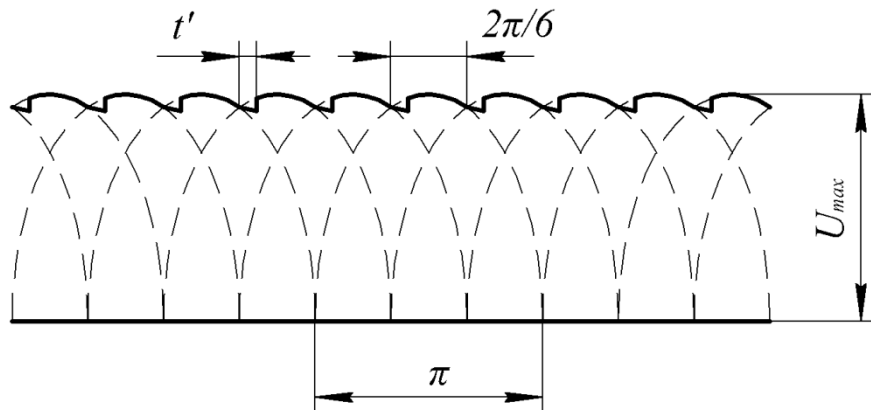


Рис. 7.1. Форма випрямленої напруги 6-пульсової схеми випрямлення

Тягові підстанції електрифікованих залізниць постійного струму в основному обладнані випрямними агрегатами, які працюють за 6-пульсною схемою випрямлення, а саме мостова схема та дві зворотні зірки з вирівнювальним реактором. Таким чином, змінна складова випрямленої напруги може бути розкладена на синусоїдні складові (гармоніки), які мають частоти 300, 600, 900, 1200 Гц, і т.д. Амплітудні значення гармонік зі збільшенням частоти знижуються. Це справедливо лише у випадку повної симетрії напруги у живлячій тягову підстанцію трифазній лінії електропередач. За умови несиметрії напруги, тобто коли $U_A \neq U_B \neq U_C$, у тяговій мережі додатково виникають гармоніки, кратні 100 Гц (100, 200, 400 Гц, і т.д.).

На даний час на тягових підстанціях застосовуються також 12-пульсні випрямлячі, які забезпечують поліпшення техніко-економічних показників роботи системи тягового електропостачання. У реальних умовах перетворення електричної енергії спектральний склад випрямленої напруги 12-пульсового випрямляча також складається з гармонік із частотами 100, 200, 300, 400 Гц і т.д., однак амплітудні значення зазначених гармонік нижче, ніж для 6-пульсних.

Перешкоджаючий вплив унаслідок електричної індукції, викликаний наявністю гармонік у кривій випрямленої напруги, як правило незначний унаслідок невеликого значення створюваного ним електричного поля. Одночасно з цим через наявність гармонік у кривій випрямленої напруги виника-

ють гармоніки і в кривих випрямленого струму, які протікають проводами контактної мережі і, замикаючись через обмотки тягових двигунів електро-рухомого складу, рейками та землею повертаються на тягову підстанцію. Саме ці гармоніки струму в тяговій мережі викликають значні перешкоджаючі напруги у суміжних пристроях унаслідок магнітної індукції.

Для зниження перешкоджаючого впливу на тягових підстанціях встановлюють зі сторони тягової мережі згладжуючі фільтри, які складаються з реакторів і резонансних контурів. Реактори розраховуються на повний струм навантаження тягової підстанції і вмикаються у провід, який з'єднується з рейками тягової мережі.

Кожен резонансний контур складається з послідовно з'єднаних ємностей C_n , індуктивностей L_n , і налаштовується на певну частоту ω_n , у відповідності з рівністю

$$\omega_n L_n = \frac{1}{\omega_n C_n}.$$

Для 6-пульсної схеми випрямлення встановлюють контури, налаштовані в резонанс на частоти 100, 200, 300, 400, 500 і 600 Гц. У спрощених варіантах конструкції останні три контури можуть бути відсутні. Контури для більш високих частот, як правило, не встановлюють, оскільки амплітудні значення гармонік у цьому випадку значною мірою знижуються. Крім цього, ці гармоніки значною мірою замикаються через шунтуючі ємності і практично не потрапляють до тягової мережі.

На тягових підстанціях постійного струму, зазвичай, застосовують загальні реактори, виготовлені з голого мідного або алюмінієвого проводу з бетонним кріпленням та індуктивністю від 3 до 11 мГн і розраховані на струми до 6000 А.

Порядок виконання роботи

1. Зібрати схему трифазного випрямляча з можливістю регулювання напруги у кожній фазі (рис. 7.1).
2. Підключити цифровий пристрій для фіксування осцилограми випрямленої напруги.
3. Виконати вимірювання симетричної роботи випрямляча при рівних напругах в кожній фазі.
4. Шляхом регулювання напруги досягти режиму з коефіцієнтом несиметрії напруги, що задається викладачем.
5. Розрахувати для кожного режиму значення наступних параметрів на стороні випрямленої та змінної напруги:
 - 5.1. постійна складова напруги U_d , В;
 - 5.2. змінна складова випрямленої напруги $U_{\sim}$, В;
 - 5.3. напруги канонічних і неканонічних гармонік $U_{кг}$ і $U_{нкг}$, В;
 - 5.4. коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю K_{2U} , %;

6. За результатами вимірювань та розрахунків заповнити табл. 7.1

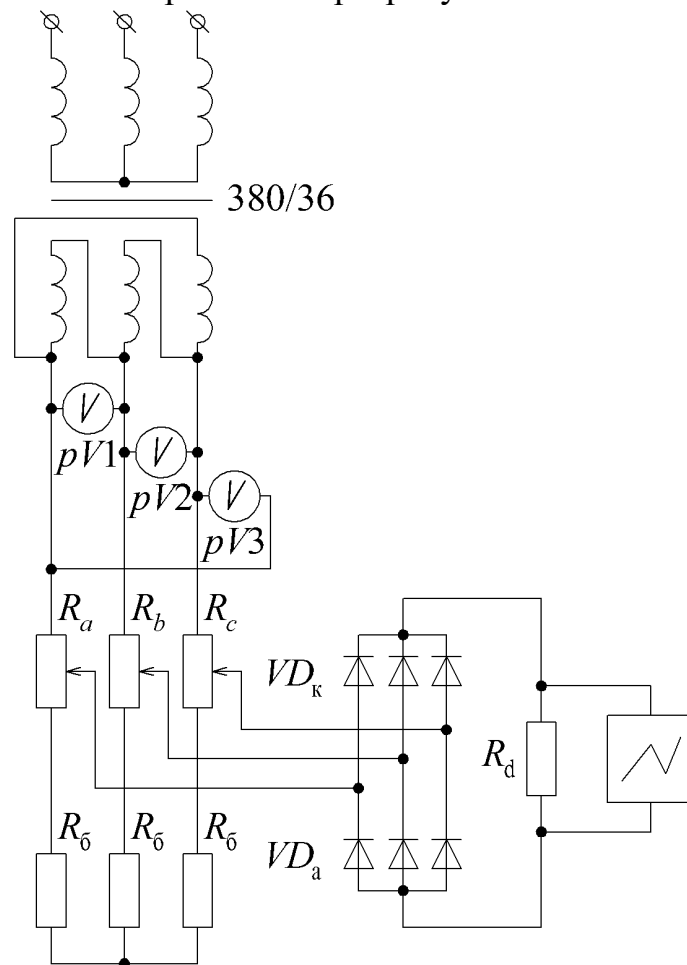


Рис. 7.1. Схема дослідження впливу несиметрії на форму випрямленої напруги

Таблиця 7.1

Результати вимірювань та розрахунків

№ пор	Параметр	Режим роботи	
		симетричний	несиметричний
1	$U_{AB}, \text{В}$		
2	$U_{BC}, \text{В}$		
3	$U_{CA}, \text{В}$		
4	$U_d, \text{В}$		
5	$U_{\sim}, \text{В}$		
6	$U_{\text{кг}}, \text{В}$		
7	$U_{\text{нкг}}, \text{В}$		
8	$K_{2U}, \%$		

Основні формули для виконання розрахунків:

– значення постійної складової випрямленої напруги

$$U_d = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T u(t) dt = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i, \text{ В};$$

– діюче значення змінної складової випрямленої напруги

$$U_{\sim} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T (u(t) - U_d)^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (u_i - U_d)^2}, \text{ А};$$

– діюче значення канонічних гармонік

$$U_{\text{кг}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n U_{6 \cdot i}^2}, \text{ В};$$

– діюче значення неканонічних гармонік

$$U_{\text{нкг}} = \sqrt{\sum (U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + U_5^2 + U_7^2 + \dots)} = \sqrt{U_{\sim}^2 - U_{\text{кг}}^2}, \text{ В};$$

– коефіцієнт несиметрії напруги визначається як відношення напруги зворотної послідовності до напруги прямої послідовності

$$K_{2U} = \frac{U_{(2)}}{U_{(1)}} \cdot 100\%,$$

де $U_{(1)}$, $U_{(2)}$ – напруги прямої та зворотної послідовностей, В;

$$U_{(1)} = \sqrt{\frac{1}{12} \left[\left(\sqrt{3} U_{AB} + \sqrt{4U_{BC}^2 - \left(\frac{U_{BC}^2 - U_{CA}^2}{U_{AB}} + U_{AB} \right)^2} \right)^2 + \left(\frac{U_{BC}^2 - U_{CA}^2}{U_{AB}} \right)^2 \right]};$$

$$U_{(2)} = \sqrt{\frac{1}{12} \left[\left(\sqrt{3} U_{AB} - \sqrt{4U_{BC}^2 - \left(\frac{U_{BC}^2 - U_{CA}^2}{U_{AB}} + U_{AB} \right)^2} \right)^2 + \left(\frac{U_{BC}^2 - U_{CA}^2}{U_{AB}} \right)^2 \right]}.$$

Напруги прямої та зворотної послідовностей відповідно можна визначити і за наближеними формулами

$$U_{(1)} = \frac{1}{3} \cdot (U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}); U_{(2)} = 0,62 \cdot (U_{\text{нб}} - U_{\text{нм}}),$$

де $U_{\text{нб}}$, $U_{\text{нм}}$ – відповідно найбільше та найменше значення з трьох лінійних напруг U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} .

Зміст звіту

1. Назва, мета та порядок виконання роботи.

2. Заповнена табл. 7.1. з чисельними значеннями вимірювань та розрахунків.
3. Осцилограми напруги та спектри гармонік у симетричному та несиметричному режимах.
4. Висновки за виконаною роботою.

Контрольні питання

1. Якими факторами визначаються пульсації трифазних випрямлячів тягових підстанцій постійного струму?
2. Які гармонійні складові виникають при роботі 6- та 12-пульсних випрямлячів у симетричних та несиметричних режимах?
3. Як змінюються амплітудні значення гармонік випрямляча при збільшенні частоти?
4. Чим викликаний перешкоджаючий вплив системи електричної тяги постійного струму?
5. Які пристрої застосовують для зниження перешкоджаючого впливу?
6. За яким принципом налаштовуються резонансні контури згладжуючих пристроїв?
7. Яке основне призначення реактора на тяговій підстанції постійного струму?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 8

ДОСЛІДЖЕННЯ ГАРМОНІЙНИХ СПОТВОРЕНЬ В ТЯГОВІЙ МЕРЕЖІ ЗМІННОГО СТРУМУ

Мета: експериментальним шляхом дослідити осцилограми первинного струму однофазного мостового випрямляча за різних співвідношень активного та індуктивного опору в колах постійного і змінного струму; проаналізувати спектральний склад первинного струму.

Короткі теоретичні відомості

У силових колах електровозів змінного струму перетворення однофазного струму в пульсуючий виконується за допомогою двопівперіодних випрямлячів, виконаних за схемами з нульовим виводом або за мостовими схемами. Форма кривої первинного струму в першу чергу залежить від електромагнітних процесів, які, в свою чергу, визначаються параметрами схеми заміщення.

Наявність індуктивності L_T у первинному колі (рис. 8.1) при навантаженні випрямляча активним опором R_d призводить до того, що півхвилі первинного струму утворюються зі зрізаних частин косинусоїд, що в свою чергу, викликає зсув першої гармоніки струму вправо відносно хвилі первинної напруги. Включення індуктивності L_d у коло випрямленого струму викликає ще більше спотворення півхвиль первинного струму.

За відсутності індуктивності в первинному колі зміна полярності півхвиль змінного струму відбувається миттєво (рис. 8.1, а). Збільшення індуктивності в колі навантаження L_d знижує хвилястість півхвиль і при $L_d = \infty$ півхвилі первинного струму ідеально згладжуються.

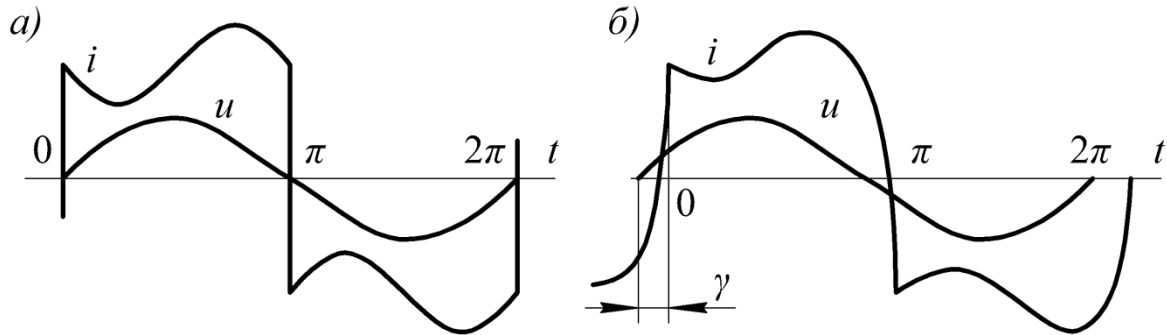


Рис. 8.1. Первинний струм мостового випрямляча

За наявності індуктивності L_T у первинному колі перехід від півхвилі однієї полярності до півхвилі іншої полярності відбувається не миттєво, а протягом деякого часу, який вимірюється кутом комутації γ (рис. 8.1, б). При збільшенні кута комутації γ , яке викликається збільшенням навантаження та первинної індуктивності L_T , спотворення форми кривої первинного струму знижується. Так, при зміні кута γ в діапазоні від 0 до 90° , коефіцієнт спотворення збільшується від $0,9$ до $0,982$.

Перешкоди у лініях зв'язку, які обумовлені електромагнітним впливом, великою мірою залежать від частоти струму тягової мережі, тому необхідно знати частотний спектр струму, яким навантажена тягова мережа при роботі випрямних електровозів. Спектр основного струму тягової мережі в процесі роботи електровозів підлягає неперервним змінам, які викликані зміною навантажень, кількості і взаємного розташування електровозів, а також зміною кількості ступенів трансформаторів електровозів.

В найбільш загальному випадку частотний спектр первинного струму електровозу складається з дискретного набору непарних гармонік, максимального значення, зазвичай, набуває 3-я гармоніка з частотою 150 Гц. Як, правило, у частотному спектрі напруги максимального значення набуває 5-а гармоніка з частотою 250 Гц за рахунок частотної характеристики тягової мережі та налаштуванні реакторів компенсуючих пристроїв тягових підстанцій на максимальну гармоніку тягового струму. Зі збільшенням частоти амплітуди гармонійних складових струму випрямних електровозів знижуються.

Порядок виконання роботи

1. Зібрати схему однофазного мостового випрямляча з можливістю регулювання параметрів в колі змінного та постійного струму (рис. 8.1).
2. Виконати підключення та налаштування цифрового вимірювального пристрою для фіксування осцилограми первинного струму мостового випрямляча.

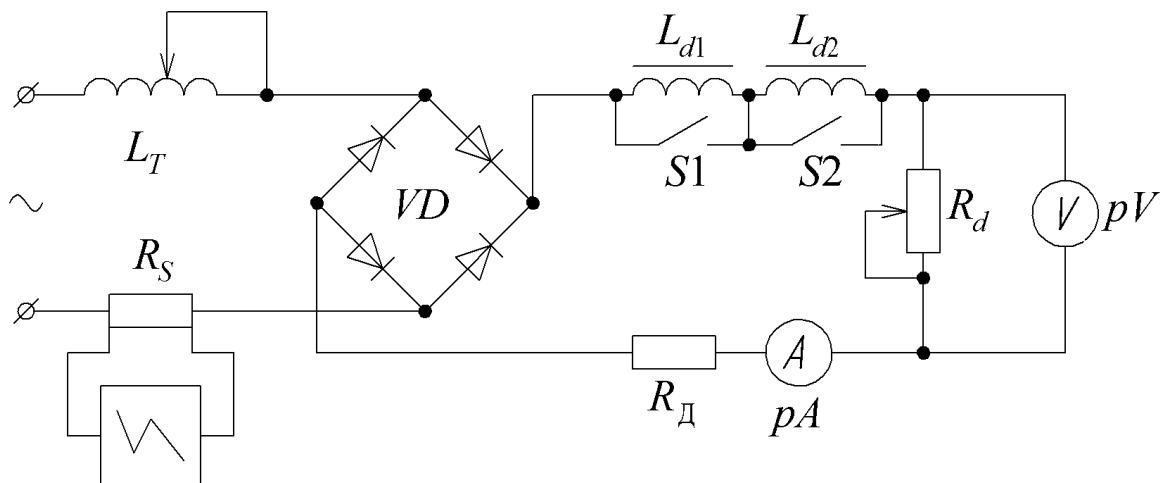


Рис. 8.1. Схема дослідження первинного струму мостового випрямляча

3. Встановити вихідні параметри схеми за середніми значеннями регульованих елементів, а саме – середнє положення ЛАТР первинного кола, включений один з дроселів (L_{d1} , L_{d2}), середнє значення опору навантаження R_d .

4. Зафіксувати осцилограму первинного струму для вихідного режиму.

5. Змінюючи первинну індуктивність схеми випрямлення за допомогою ЛАТРу до мінімального та максимального значення зафіксувати осцилограми первинного струму. Повернути регулятор ЛАТРу у вихідне положення.

6. Регулюючи індуктивність у колі випрямленого струму за допомогою перемикачів $S1$, $S2$, що шунтують дроселі, встановити мінімальне та максимальне значення параметрів та зафіксувати осцилограми струму. Повернути вимикачі $S1$, $S2$ у вихідне положення.

7. Почергово встановивши опір резистора R_d мінімальним та максимальним, зафіксувати осцилограми первинного струму.

8. Для кожного режиму та кожної осцилограми розрахувати спектральний склад за допомогою перетворення Фур'є і обчислити коефіцієнти спотворення. За результатами заповнити табл. 8.1.

Таблиця 8.1

Результати вимірювань та розрахунків

№	Режим	U , В	I , А	I_1 , А	I_Γ , А	K_I , %
1	Базовий					
2	L_T max					
3	L_T min					
4	L_d max					
5	L_d min					
6	R_d max					
7	R_d min					

Основні формули для виконання розрахунків:

– діюче значення гармонійних складових первинного струму

$$I_{\Gamma} = \sqrt{\sum_{i=3}^n I_i^2} = \sqrt{I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_9^2 + \dots}, \text{ А};$$

– коефіцієнт спотворення синусоїдності кривої струму

$$K_I = \frac{I_{\Gamma}}{I_1} \cdot 100 \% = \frac{\sqrt{I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_9^2 + \dots}}{I_1} \cdot 100 \%.$$

Зміст звіту

1. Назва, мета та порядок виконання роботи.
2. Заповнена табл. 8.1. зі значеннями вимірювань та розрахунків.
3. Осцилограми струму та спектри гармонік у кожному режимі.
4. Висновки за виконаною роботою.

Контрольні питання

1. Які схеми випрямлення застосовують на електровозах змінного струму?
2. Який проміжок часу вимірюють за допомогою кута комутації?
3. Від яких факторів залежить форма кривої первинного струму електро-
возу змінного струму?
4. Як впливає зміна кута комутації на форму кривої первинного струму?
5. Якими факторами визначається спектр тягового струму в мережі?
6. Які складові характерні для спектру гармонік на змінному струмі?

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Далека В. Х., Нем В. К., Скуріхін В. І. Електропостачання електричного транспорту : навч. посіб. Харків : ХНАМГ, 2012. 168 с.
2. Павленко Т. Н., Лукашова Н. П. Електропостачання транспорту: навч. посібн. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. 216 с.
3. 3. ЦЕ – 0023. Правила улаштування та технічного обслуговування контактної мережі електрифікованих залізниць : затверджені наказом Укрзалізниці від 20.11.2007 р. № 546-Ц. Київ : Укрзалізниця, 2008. 208 с.
4. Методика обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії між електропередавальною організацією та її споживачами. Затв.: Наказ Міністерства палива та енергетики України 17.01.2002, № / Мін-во палива та енергетики України. Київ, 2002. 14 с.
5. ДСТУ EN 50160:2014 Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності. Чинний від 2021-09-01. Вид. офіц. Київ : Мінекономрозвитку України, 2014. 32 с.
6. Бондар І. Л., Бондар О. І., Сиченко В. Г. Електричні системи та мережі нетягових споживачів залізничного транспорту : навч. посіб. для вузів. Дніпропетровськ : Маковецький, 2009. 184 с.
7. Сиченко В. Г., Гаврилюк В. І. Електроживлення систем залізничної автоматики : монографія. Дніпропетровськ : Маковецький, 2009. 372 с.
8. Kiessling F., Puschmann R., Schmieder A. Contact lines for Electric Railways, Planning, Design and Implementation. Hoboken : Wiley, 2001. 820 p.
9. Bosyi D., Sablin O., Kosariev Ye. Computing and Optimization for DC Power Systems of Electric Transport. London : World Scientific Publishing Europe Ltd, 2020. 220 p.

Навчально-методичне видання

Босий Дмитро Олексійович
Антонов Андрій Владиславович
Земський Денис Романович

ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт

Редактор А. В. Безверхня
Комп'ютерна верстка В. В. Бердо

Формат 60x84 _{1/16}. Ум. друк. арк. 2,7. Обл.-вид. арк. 2,8.

Зам. № 61

Видавець: Український державний університет науки і технологій
вул. Лазаряна, 2, ауд. 2216, м. Дніпро, 49010.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 7709 від 14.12.2022

Адреса видавця та дільниці оперативної поліграфії:
вул. Лазаряна, 2, Дніпро, 49010