

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

“Допущено до захисту”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор
_____ Петро ПЛІШКОВ
“ ____ ” _____ 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої освіти
на тему:
«Дослідження режимів тягового електропостачання
ділянок залізниці»
«Study of traction power supply modes for railway sections»

Виконав здобувач вищої освіти
II курсу групи ЕЕ-22М
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»,
освітньо-професійної програми
«Електротехнічні системи
електроспоживання»
_____ Дмитро КОМПАНИЄЦЬ
« ____ » _____ 2023 р.

Керівник роботи
доцент, канд.техн.наук
_____ Ігор ПЕРЕВЕРЗЄВ
« ____ » _____ 2023 р.

Рецензент _____

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма Електротехнічні системи електроспоживання

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

Петро ПЛЄШКОВ

«_____» _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Компанійця Дмитра Олеговича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) Дослідження режимів тягового електропостачання ділянок залізниці

Study of traction power supply modes for railway sections

2. Керівник роботи (проекту) Переверзєв Ігор Олексійович, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання студентом роботи до захисту 20.12.2023 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи

1. Дослідження режимів тягового електропостачання ділянок залізниці.

2. Дослідження системи тягового електропостачання ділянки Користівка–

Бурти–Кременчук. 3. Дослідження системи тягового електропостачання ділянки

Знам'янка–Долинська. 4. Оцінка якості електричної енергії на дослідних тягових

підстанціях. 5 Охорона праці.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>доц., к.т.н. І.В. Савеленко</i>		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Дослідження режимів тягового електропостачання ділянок залізниці.</i>	<i>10.10.2023</i>	
2	<i>Дослідження системи тягового електропостачання ділянки Користівка–Бурти–Кременчук.</i>	<i>24.10.2023</i>	
3	<i>Дослідження системи тягового електропостачання ділянки Знам'янка–Долинська.</i>	<i>07.11.2023</i>	
4	<i>Оцінка якості електричної енергії на дослідних тягових підстанціях.</i>	<i>18.11.2023</i>	
5	<i>Охорона праці</i>	<i>28.11.2023</i>	
6	<i>Оформлення пояснювальної записки</i>	<i>08.12.2023</i>	
7	<i>Оформлення презентаційної частини роботи</i>	<i>18.12.2023</i>	

Дата видачі завдання
«___» _____ 2023 р.

Підпис керівника _____

Ігор ПЕРЕВЕРЗЄВ

Завдання прийнято до виконання
«___» _____ 2023 р.

Підпис здобувача _____

Дмитро КОМПАНІЄЦЬ

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 78 с.; 43 рис.; 6 табл.; 11 джерела, 1 додаток

Компанієць Д.О. Дослідження режимів тягового електропостачання ділянок залізниці. 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання». Центральноукраїнський національний технічний університет. Кропивницький, 2023 р.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження забезпечення потужності пристроями електропостачання під час електрифікації нової ділянки Одеської залізниці, дослідження якості електроенергії під час підключення тягових підстанцій, розроблення рекомендацій щодо забезпечення та збільшення пропускної спроможності дослідницької ділянки.

Метод дослідження полягає в проведенні експериментальних досліджень одночасно на декількох тягових підстанціях змінного струму, розрахунку електричної тяги, статистичному аналізі отриманих результатів.

Робота містить основну інформацію про енергетичні характеристики системи електричної тяги змінного струму, результати експериментальних досліджень, розрахунок електричної тяги, моделювання режиму роботи енергосистеми, системний аналіз якості електроенергії, оцінку економічної ефективності впровадження регульованої компенсації реактивної потужності.

Ключові слова: електромагнітна сумісність, якість електричної енергії, показники якості електроенергії, система тягового електропостачання, тягові підстанції змінного струму, режими напруги, пропускна здатність, завантаження трансформаторів.

SUMMARY

Kompaniiets D. Study of traction power supply modes for railway sections. 141 "Electric power, electrical engineering and electromechanics" EPP, "Electrotechnical Systems of Power Consumption". Central Ukrainian National Technical University. Kropyvnytskyi, 2023.

The purpose of the qualification work is to study the provision of power by power supply devices during the electrification of the new section of the Odesa Railway, study the quality of electricity during the connection of traction substations, develop recommendations for ensuring and increasing the throughput of the research section.

The research method consists in conducting experimental studies simultaneously at several traction substations of alternating current, calculation of electric traction, statistical analysis of the obtained results.

The work contains basic information about the energy characteristics of the alternating current electric traction system, the results of experimental studies, calculation of electric traction, modeling of the operation mode of the power system, system analysis of the quality of electricity, assessment of the economic efficiency of the introduction of regulated reactive power compensation.

Keywords: electromagnetic compatibility, electric power quality, power quality indicators, traction power supply system, AC traction substations, voltage regimes, throughput, transformer loading.

ЗМІСТ

	ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	6
	ВСТУП	7
1.	ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ДІЛЯНОК ЗАЛІЗНИЦІ	10
1.1.	Аналіз перспективних напрямів розвитку електричної тяги на залізниці	10
1.2.	Оцінка енергетичних показників систем електротяги змінного струму	12
2.	ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ДІЛЯНКИ КОРИСТІВКА–БУРТИ–КРЕМЕНЧУК.	31
2.1.	Оцінка параметрів споживання електроенергії на тягових підстанціях	31
2.2.	Електротяговий розрахунок	39
2.3.	Моделювання режимів роботи системи електропостачання	41
2.4.	Висновки дослідів короткого замикання на ділянці	43
2.5.	Аналіз завантаження пристроїв електропостачання	45
3.	ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ДІЛЯНКИ ЗНАМ'ЯНКА–ДОЛИНСЬКА	50
3.1.	Вимірювання параметрів електроспоживання на тягових підстанціях	50
3.2.	Аналіз завантаження пристроїв електропостачання	55
4.	ОЦІНКА ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НА ДОСЛІДНИХ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЯХ	58
4.1.	Загальне оцінювання характеристик якості	58
4.2.	Вплив режиму роботи компенсуючих пристроїв на показники якості електроенергії	67
	ЗАКЛЮЧЕННЯ	70
	СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	72
	ДОДАТКИ	74
A	ОХОРОНА ПРАЦІ	75

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ЛЕП – лінія електропередач;
ЕП – електричні приймачі;
ГЗП – головна знижувальна підстанція;
ЦЕН – центр електричних навантажень;
ПЛ – повітряна лінія;
КЛ – кабельна лінія;
Ш – шини;
ТП – трансформаторна підстанція;
СД – синхронний двигун;
ЕОМ – електронна обчислювальна машина;
КЗ – коротке замикання;
АД – асинхронний двигун;
СД – синхронний двигун;
Е.Р.С. – електрорушійна сила;
РЕМ – район електричних мереж;
ГПЕ – головний потік енергії;
РСН – режим середнього навантаження;
ТС – трансформатор струму;
ТН – трансформатор напруги;
БСК – батареї статичних конденсаторів;
СК – синхронний компенсатор;
З – Знам'янка;
О – Олександрія;
П – П'ятихатки.

ВСТУП

Щоб забезпечити змагання з різними видами транспорту, залізниці потребують значного підвищення ефективності використання інфраструктури. Ціль цю неможливо досягнути тільки шляхом продовження виконаних до цього дій щодо раціоналізації та інвестицій у реконструкцію та зведення нових ліній. При загальному аналізі залізниці важливою стратегічною постаттю є витрати на інфраструктуру. Величина економічної ефективності повинна бути значно підвищена, що вимагає значного скорочення витрат, які постають у процесі експлуатації мережі, при паралельному піднятті продуктивності.

Конкурентоспроможності Укрзалізниці може бути збережена на постійну перспективу тільки коли будуть гарантовані перевезення по більшому числу маршрутів з підвищеною якістю та меншими витратами.

Основою на цьому, для майбутньої конфігурації мережі визначаються три стратегічні цілі:

- підвищення співвідношення “ціна - продуктивність” з високою ефективністю впроваджуваних заходів щодо інфраструктури;
- вдосконалення того самого співвідношення через значне зменшення витрат на діючій мережі;
- вдосконалення пропозицій у сфері вантажних перевезень насамперед за рахунок можливості безперервного вивозу вантажів, а у пасажирських перевезеннях - шляхом зменшення тривалості подорожей.

Основними параметрами для оцінки заходів повинні стати: обсяг інвестицій по кожному окремому заходу, терміни його впровадження та можливість ефективного використання, витрати експлуатаційні та на технічне обслуговування, швидкість маршруту пасажирських потягів.

Пропускна спроможність інфраструктури разом з технічним оснащенням ліній (застосуванням нових технологій) визначається діапазоном швидкостей потягів, що курсують по них (програмою експлуатації). Чим більш гармонічним

є цей діапазон, тим більше потягів може проїхати по лінії за одиницю часу. Дякуючи поділу швидких пасажирських та вантажних перевезень, діапазон швидкостей можна узгодити вже на початковому етапі. Навіть якщо у майбутньому на цих лініях будуть виконуватися також регіональні перевезення, підвищення пропускної спроможності все одно буде складати до 25%. Якщо для швидких пасажирських перевезень довгого сполучення додатково будуть виділені спеціальні лінії, збільшення пропускної спроможності може сягати до 45% [1].

За поглядом експертів, є численні аспекти, які впливають на пропускну спроможність ліній. Серед десяти найбільш значущих можна вказати такі:

- кількість і довжина прямовання поїздів, що курсують по лінії;
- потужність локомотивів;
- максимальне число поїздів у пікові періоди протягом тижня і доби;
- умови місцевості (характеристики ухилів і поворотів);
- відмінності в швидкості руху поїздів різних категорій, пріоритети диспетчерського керування;
- обмеження швидкості руху поїздів через стан інфраструктури;
- система сигналізації та зв'язку;
- відношення ділянок, що мають різну кількість колій;
- довжина роздільних пунктів і відстань між ними;
- обладнання вантажно-розвантажувальних терміналів.

Сьогодні створені різні методики та технічні засоби планування підвищення пропускної здатності, що включають:

- історичний аналіз трендів зміни ходового часу, довжини поїзда і питомої (на 1 т перенесеного вантажу) потужності локомотивів;
- огляд складених і виконаних диспетчерських графіків руху поїздів, що стає можливим після введення диспетчерського контролю руху поїздів;
- маркетингове дослідження і прогнозування ринку вантажних перевезень за об'ємом і характером;

- визначення альтернативних схем руху поїздів;
- таблиця розрахунку деяких значущих експлуатаційних характеристик, таких як витрата палива локомотивами та безперервний час руху поїздів, за допомогою математичних моделей;
- імітація диспетчерського управління рухом поїздів за допомогою математичної моделі.

Електрифікація залізниць вважається однією з найключовіших технічних ініціатив, які забезпечують підвищення економічної ефективності залізничного транспорту. Так, електротранспорт на 33% ефективніше за витратами енергії, на його сервіс потрібно в 2 рази менше ресурсів. Частка в собівартості перевезень на електропотязі в 1,6 рази нижча, ніж на тепловозній тязі. Електрифікація, виключаючи з експлуатації тепловози, усуває і проблеми у вигляді великої кількості вихлопних газів, забруднення ґрунту дизельним паливом із баків тепловозів. Основні переваги електрифікації залізниць це зниження вартості процесу перевезень, зниження впливу на довкілля, збільшення пропускної спроможності магістралей. Крім того, без проведення робіт з електрифікації та модернізації напрямків неможливо впровадити прискорений пасажирський рух.

Першорядним завданням системи електропостачання є підтримка оперативного функціонування залізниці. Для досягнення цієї мети важливо, щоб потужність усіх компонентів системи електропостачання є достатньо великою, щоб забезпечувати кожному локомотиву необхідну потужність в кожних умовах роботи залізничного маршруту. Ці вимоги можуть бути задоволені тільки з правильно вибраними параметрами системи електропостачання, які забезпечують роботу обладнання в прийнятних межах навантаження та вимогами до якості електричної енергії (наперед напруги), а також з урахуванням необхідного резерву.

1. ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ДІЛЯНОК ЗАЛІЗНИЦІ

1.1. Аналіз перспективних напрямів розвитку електричної тяги на залізниці

Зараз система залізниць України південно-західного напрямку працює далеко не в повній мірі.

"Укрзалізниця" прагне збільшити дохід від транзитних вантажоперевезень. Для цього необхідний перехід поїздів на електротягу. Електрифікація здійснюється в рамках проекту швидкісного руху, відокремлення вантажних та пасажирських потоків. Перший етап цього проекту охоплює зону Кременчук – Бурти – Користівка. На наступному етапі електрифікації залізниці стане проект електрифікації ділянки Долинська-Миколаїв-Херсон, довжиною 394 км. Техніко-економічне обґрунтування цього проекту могло було б створено додатковий, паралельний до основного, електрифікований маршрут. Електрифікація маршруту Знам'янка – Одеса та введення додаткової колії призведуть не лише до зростання інтенсивності руху поїздів, а й приведе до зниження вартості перевезень на 15 – 20%.

Додатково, Україна, за мирних часів, досягла угоди з сусідніми залізницями, яке гарантує Україні до 80% транзитних товарів, стосовно розширення інфраструктури прикордонної зони. На західних кордонах вже модернізуються станції Мостиська, Яготин та Чоп. Технології електронного обміну даними також будуть вдосконалені. Інформація про вантажі з Польщі та Німеччини буде передаватися через електронні системи.

Інвестиційну програму залізничного транспорту, схвалену Кабінетом міністрів України і розраховану на приблизно \$1 млрд. 220 млн. лише для оновлення рухомого складу, впроваджує державна адміністрація залізничного транспорту ("Укрзалізниця"). Ці інвестиції проходять у контексті реформування залізничної галузі в Україні.

Ключовим проектом у сфері залізничного транспорту є комплексна електрифікація південно-східного напрямку “Укрзалізниці” та модернізація підстанційного обладнання, спрямована у напрямку великих українських міст.

Програма електрифікації залізниць України, є одним з ведучих напрямків розвитку залізничного транспорту України. Отже, експлуатаційна довжина електрифікованих колій залізниць України становила 9846,6 км, які складають 44,2 % від загальної довжини головних колій “Укрзалізниці”, а 84,2 % експлуатаційної роботи залізниць виконується за рахунок електротяги. Планується, що буде електрифіковано 2254 км колій. Головні роботи планується виконати на Південній та Одеській залізницях.

Електрифікація ділянки Знам’янка – Долинська – Миколаїв – Херсон допоможе збільшенню пропускної здатності та реалізацією проекту запровадження на цій ділянці швидкого руху пасажирських поїздів. Також, успішне завершення електрифікації дасть змогу зменшити транспортну частину вартості таких ключових вантажів, як нафта, залізна руда та інші, при транспортуванні їх залізницями. В рамках проекту намічається спорудження другої колії та проведення електрифікації залізниць із створенням тягових підстанцій, тягової мережі та монтажу ліній живлення автоблокування, електричної централізації зв’язку та високовольтних ліній зовнішнього електропостачання для їх живлення. Як результат реалізації проекту буде електрифіковано 302 км напрямку та влаштовано 474 км другої колії та допоміжних колій.

Загальна довжина електрифікованої ділянки за маршрутом Кременчук – Бурти – Користівка досягає 59 км. Протяжність електрифікованих залізничних колій на цієї ділянки становить 152,6 км. У майбутньому планується спорудження стаціонарної тягової підстанції на станції Кременчук та виробничої бази дистанції електропостачання, яка буде інтегрована з діючим районом контактної мережі.

1.2. Оцінка енергетичних показників систем електротяги змінного струму

Характеристика робочих циклів системи тягового електропостачання змінного струму (СТЕ) залежить від параметрів навантаження, напруг на тягових підстанціях і в тяговій мережі. Суттєві відхилення тягового навантаження і його неоднорідність ускладнюють процес вибору обчислювальних навантажень для визначення потрібної потужності устаткування СТЕ.

Навантаження електрифікованого відрізка протягом місяця мають відмінності протягом року в межах 1,2–1,35 рази [2]. Максимальне споживання активної та реактивної потужності відбувається в 3 кварталі та зимові періоди. При визначенні потужності устаткування СТЕ ключовим є урахування динаміки навантаження, яка обумовлена коефіцієнтом ефективності $\kappa_e = I_e / I_{cp}$ (де I_e та I_{cp} це середньоквадратичне та середнє значення тягового навантаження відповідно). Значення κ_e для навантаження на гілках живлення підстанції О в основному варіюється від 1,0 до 1,1, причому з ростом навантаження цей коефіцієнт знижується (див. рис. 1.1.). Вищі значення κ_e характерні для одноколійних відрізків. При незалежній роботі підстанцій значення коефіцієнта κ_e , як правило, збільшується.

Співвідношення струмів гілок підстанцій, які забезпечують електропостачання магістральних відрізків залізниць, зазвичай становить 0,3–3,7, а їх середні значення $n_{cp} = 0,5 \dots 3$. На добові показники n_{cp} впливають зміни в схемах живлення та випадки відключення контактної мережі через ремонтні втручання. Особливість схеми секціонування контактної мережі змінного струму полягає в тому, що два фідери однієї фази підстанції, яка розміщена на великому залізничному магістральному вузлі, забезпечують живлення одного напрямку (гілки) залізниці, в той час як інші фідери, підключені до іншої фази, живлять протилежний напрямок і всі станційні

колії. В результаті, для таких підстанцій характерною є велика розбіжність у середніх струмах гілок живлення (у середньому – в 1,4 рази).

Співвідношення максимального (10-хвилинного) навантаження до середнього, що описується коефіцієнтом інтенсивності κ_i), на підстанції О, як правило, дорівнює 1,1-2,2, при цьому нижчі значення спостерігаються при більшому тяговому навантаженні (рис. 1.2. показує κ_i для навантаження правої та лівої гілок живлення). У випадку відключення сусідньої підстанції навантаження на живильні гілки росте в 1,5-2 рази, а в районі підсилення - в 1,3-1,6 рази.

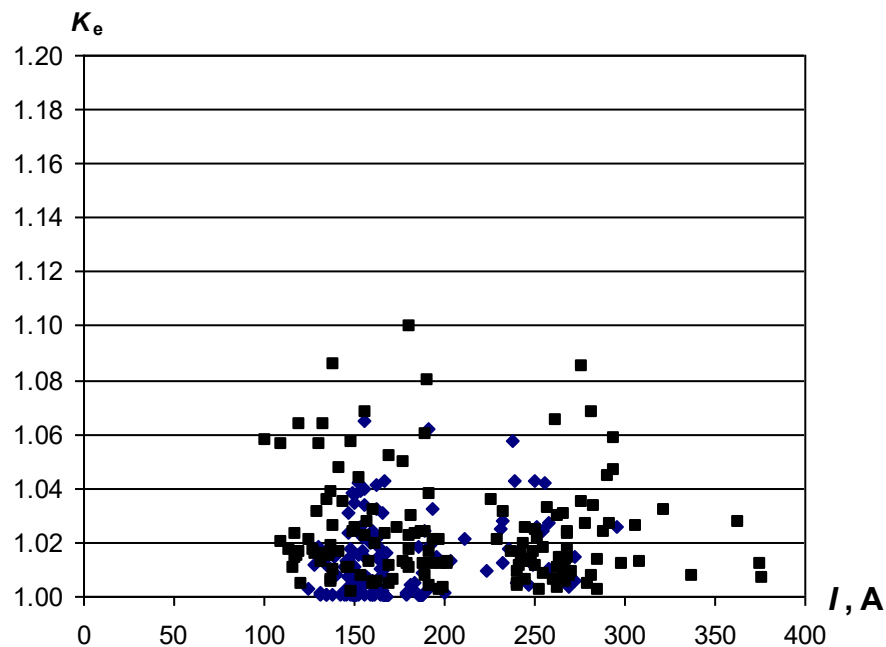


Рис. 1.1. Зв'язок між показником ефективності та навантаженням тягової станції О

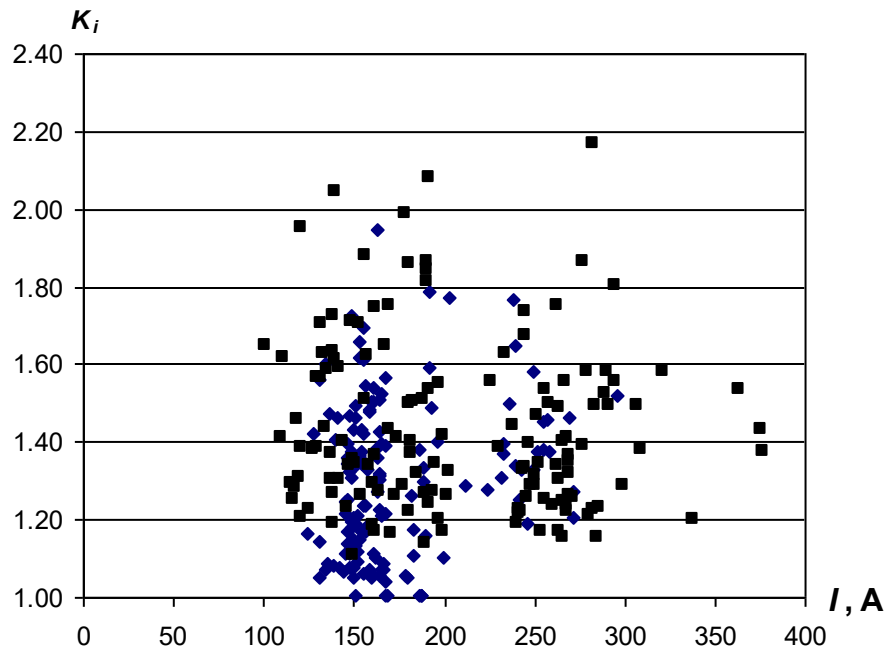


Рис. 1.2. Співвідношення між максимальним та середнім навантаженням на тяговій станції О

Незважаючи на те, що ці режими тривають всього 1-2% за рік, вони в деяких випадках є вирішальними для визначення потужності конденсаторів [3].

На більшій частині тягових станцій з регульовальними пристроями в середньому напруга на шинах становить 26,5-28 кВ, і зазвичай вона не перевищує межі від 25 до 29 кВ. На станції, яка живиться через довгу ЛЕП 110 кВ, напруга може бути нижчою.

З досліджень випливає, що розподіл напруги на шинах 27,5 кВ досить точно описується нормальним законом, що може бути використано в практичних розрахунках. Середньоквадратичне відхилення напруги, яке відображає її коливання, віддаленість станцій від енергосистем за цим показником складає 0,5-1,2 кВ. Отже, найбільшій розбіжності напруги від середнього показника на шинах станції складає 1,5-3,6 кВ.

Коливання напруги в контактній мережі мають ширший діапазон, ніж на станції. Особлива увага надається примусовим режимам, коли при вимкненій суміжній підстанції напруга на шинах може знизитися до 24-25 кВ, а в контактній мережі – до 19-20 кВ. В деяких випадках ці режими є

вирішальними при обранні інтервалів між поїздами та визначенні пропускної спроможності залізниць.

Несиметричне тягове навантаження спричиняє несиметричність напруги. Середньоквадратичний показник несиметрії K_{2U} для більшості тягових станцій не перевищує 5%. На станціях, що знаходяться на значній відстані від енергосистем і що живлять великі залізничні вузли, цей показник може бути вищим через їхнє велике завантаження і розбіжність середніх струмів плечей живлення. В мережах 35 кВ, що отримують енергію від тягових підстанцій З та О, показники K_{2U} складають 4 % та 4,7 % відповідно. Зазвичай на станціях, які живлять великі залізничні вузли, або там, де контактна мережа живиться від однієї фази, середній показник коефіцієнта несиметрії є більшим, ніж на підстанціях, які забезпечують енергією магістральні ділянки.

У випадку значної несиметрії напруги (згідно з [4] – більш ніж 2%), доцільно поміркувати над зниженням несиметрії за допомогою конденсаторних установок, порівняно з іншими засобами.

Несиметричне тягове навантаження викликає несиметрію напруги. На підстанціях, що знаходяться значною відстанню від системи, коефіцієнт несиметрії напруги 27,5 кВ K_U може досягнути 8-13%, а під час рекуперації він може бути 12-16% і вищим. На експериментальних тягових підстанціях З, О, Т, Ш найбільші значення K_U було відповідно 9,4 %; 7,3 %; 6,4 % та 13,5 %.

Найбільше значення мають гармоніки 3, 5, 7-а, при цьому через резонансні ефекти в первинній мережі 154 кВ, 5-а гармоніка, як правило, відповідає 3-ій і, навіть, може її перевершити.

Під час несиметричного режиму, що є типовим для системи електроприводу, активна потужність в однофазній мережі визначається як

$$P = \sum_i^{\infty} I_i U_i \cos \varphi_i \quad (1.1)$$

де - I_i, U_i це значення i -ї гармоніки струму і напруги;

φ_i - це кут зсуву фази I_i відносно U_i .

Повна потужність обчислюється за формулою

$$S = I \cdot U \quad (1.2)$$

де I, U - діючі значення несинусоїдного струму і напруги.

Раніше припускалося, що спотворення кривої напруги на тягових підстанціях незначне, таким чином брали $P = I_1 \cdot U_1 \cos \varphi_1$ (тут I_1, U_1, φ_1 - це значення напруги, струму та їх кут зсуву фази для першої гармоніки).

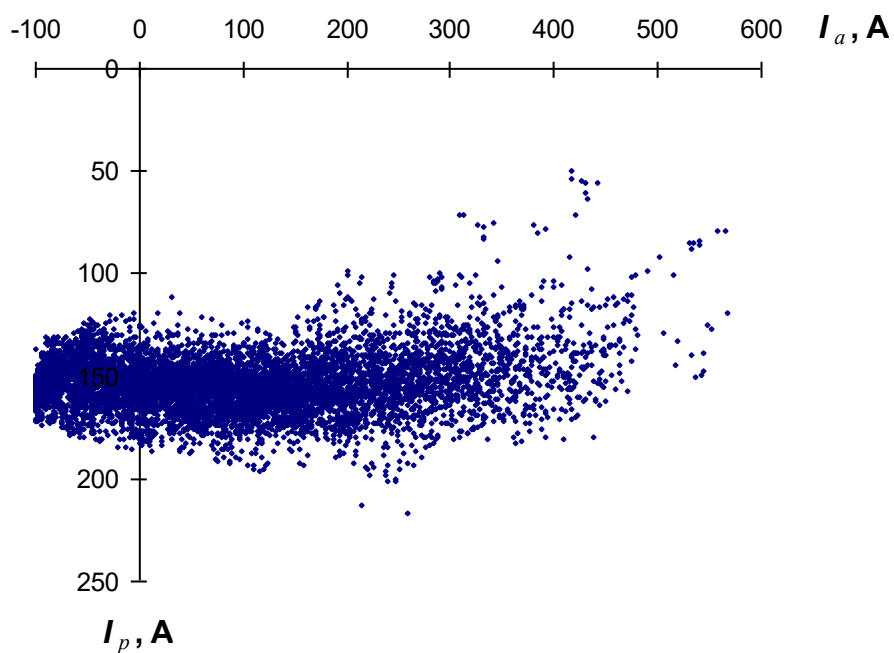
Через постійну зміну робочого режиму та переміщення рухомих одиниць, коефіцієнт потужності тягового навантаження підстанції безперервно міняється [5]. На основних ділянках цей коефіцієнт коливається в порівняно вузьких межах, стабілізуючись з поступовим зростанням навантаження понад 100-200 А. Взаємозв'язок активних та реактивних складових навантаження наближається до функціонального (див. рис. 1.3).

Протягом періоду вимірювань на підстанції О, коефіцієнт потужності $\cos \varphi_1$ коливався в досить широкому діапазоні від -1,0 до +1,0, в залежності від плеча енергопостачання (середньо по підстанції $\cos \varphi_1 = 0,611$).

Коли тягові підстанції працюють паралельно, $\cos \varphi_1$ фідери зазнають змін навантаження в більш широкому діапазоні. Фідери, що живлять великі залізничні вузли, парки, депо, сортувальні станції та розгалужені станційні колії, мають тягове навантаження, яке $\cos \varphi_1$ досить низьке. Причина в тому, що електровози, як правило, працюють на початкових ступенях контролера з частими пусками. Отже, $\cos \varphi_1$ варіює в діапазоні 0,3-0,7 (див. рис. 1.3,а), і зазвичай при розрахунках його приймають приблизно 0,6. На підстанціях з подібними фідерами низький $\cos \varphi_1$ спостерігається на плечі з вищим навантаженням, що необхідно враховувати, перш за все, при проектуванні конденсаторних установок. Миттєве значення $\cos \varphi_1$ також залежить від перетоків транзитної потужності по тяговій мережі, спричинених вирівнювальними струмами (рис. 1.3, а). Від'ємні значення $\cos \varphi_1$

спостерігаються при перекомпенсації, що документовано для правого плеча живлення підстанції О (рис. 1.3,б).

а)



б)

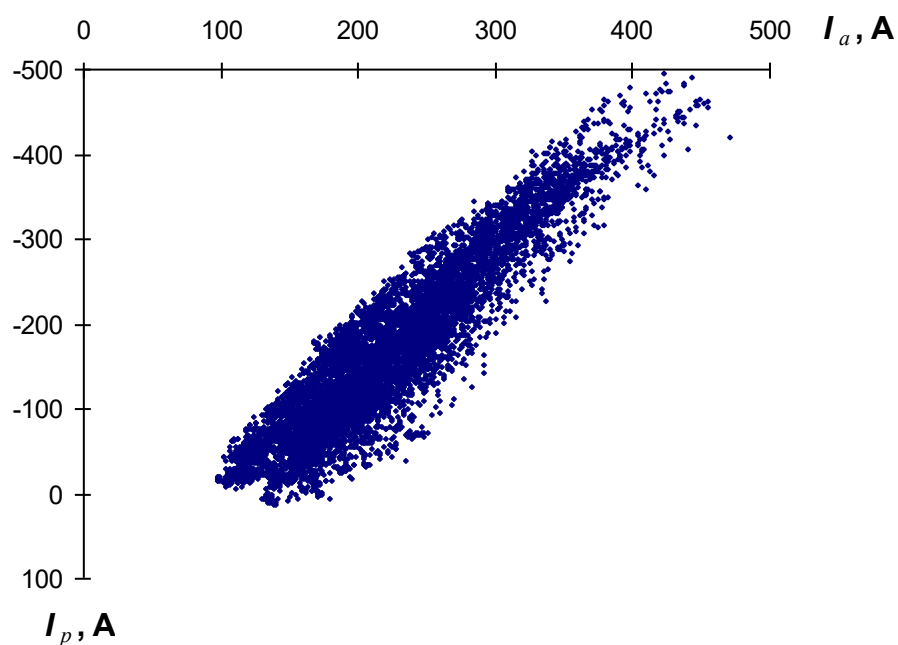


Рис. 1.3. Діаграма кінців вектора струмових плечей підстанції О:
а відноситься до лівого плеча, б відноситься до правого плеча живлення

Щоб вирішити проблеми компенсації реактивної потужності, середньозважені значення реактивної потужності часто недостатньо практичні. Важливо знати споживану та генеровану реактивну потужність для окремих робочих режимів тягової мережі (зазвичай для найбільшого та найменшого навантаження). Таким чином, застосування коефіцієнта потужності може бути доцільним лише для конкретних режимів роботи тягової мережі [6].

Застосування рекуперативного гальмування знижує споживання активної потужності та збільшує споживання реактивної потужності, внаслідок чого коефіцієнт потужності значно знижується. Коли на зоні фідера працюють лише електровози в режимі рекуперації, коефіцієнт потужності навантаження плеча живлення варіює в межах 0,2-0,4. Під час сумісної роботи електровозів в режимах тяги та рекуперації відбувається обмін активною енергією між ними, при цьому реактивна енергія всіх електровозів споживається від енергосистеми. Таким чином, на підстанції можуть бути ситуації, коли коефіцієнт потужності знижується до 0-0,3. Однак, як показує практика ділянок, де використовується режим рекуперації, коефіцієнт потужності знижується на 0,02-0,08 через незначну частку рекупераційного струму в режимі максимального тягового навантаження. Тому для областей з рекуперацією потрібно збільшити потужність конденсаторних установок.

Вивчення ефективності спільної роботи джерела та приймача електричної енергії за нерегулярних умов напруги і струму, зокрема, аспекти компенсації енергії, яка при таких ситуаціях відсутня, привертають значну наукову увагу у контексті широкого розвитку систем перетворення енергії [7].

Розглянемо універсальний підхід до вибору активних і обмінних характеристик пасивного приймача електричної енергії (двополюсника), виходячи з фізичної природи процесів використання та обміну енергією на його вході. Це питання стає найцікавішим у практичному та теоретичному плані, коли початковими змінними є функції напруги і струму на вході

приймача, а їх активні та обмінні характеристики потребують визначення. Причому, припускається що зазначені функції $u(t)$ і $i(t)$ відповідають критеріям Діріхле.

Згідно теореми Умова – Пойнтінга, процес перетворення електричної енергії в замкненому просторі, що відсутній у енергетичному обміні з зовнішнім середовищем, визначається наступним відношенням [8]:

$$\int_V \bar{\delta} \bar{E}_{\text{стор}} dV = \int_V \bar{\delta} \bar{E} dV + \int_V \left(\bar{H} \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} + \bar{E} \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \right) dV \quad (1.4)$$

або

$$\int_V \bar{\delta} \bar{E}_{\text{стор}1} dV = \int_V \bar{\delta} (\bar{E} + \bar{E}_{\text{стор}2}) dV + \int_V \left(\bar{H} \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} + \bar{E} \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \right) dV, \quad (1.5)$$

де $\bar{\delta}$ – це щільність струму; $\bar{E}$ – це напруженість електричного поля; $\bar{E}_{\text{стор}} = \bar{E}_{\text{стор}1} - \bar{E}_{\text{стор}2}$ – це напруженість електричного поля, викликана впливом зовнішніх сил під час перетворення деякої форми енергії на електричну, та під час перетворення електричної енергії на інший вид енергії ($-\bar{E}_{\text{стор}2}$); $\bar{H}$ – це напруженість магнітного поля; $\bar{B}$ – магнітна індукція; $\bar{D}$ – електрична індукція.

Рівняння (1.4) і (1.5) описують баланс зміни електричної енергії в заданому об'ємі. Рівняння (1.5) демонструє, що зміна загальної енергії

$\left[\int_V \bar{\delta} \bar{E}_{\text{стор}1} dV \right]$, відданої джерелами, розподіляється між зміною енергії $\left[\int_V \bar{\delta} (\bar{E} + \bar{E}_{\text{стор}2}) dV \right]$ яка відповідає процесу незворотного використання, і на

зміну тимчасово накопиченої енергії $\left[\int_V \left(\bar{H} \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} + \bar{E} \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \right) dV \right]$ магнітного і електричного полів, тобто на невикористану.

Далі процес конвертації електричної енергії в другий тип енергії називатимемо процесом споживання електричної енергії. Наведені вище інтеграли характеризують:

1. Процес отримання електричної енергії.

Швидкість зміни енергії сторонніх джерел, що підтримують цей процес, визначається лівою частиною рівняння (1.5) – інтеграли $\left(\int \bar{\delta} \bar{E}_{\text{стор1}} dV \right)$. Після побудови цього інтеграла для замкненої системи електропостачання, яка включає n джерела електричної енергії, отримаємо

$$\sum_1^n s_k = \sum_1^n u_k i_k \quad (1.6)$$

де s_k , u_k , i_k – це вузли часу миттєвої потужності, напруги та струму k -го джерела відповідно.

У разі одного джерела $s = u \cdot i$. Отже, загальна миттєва потужність усіх джерел дорівнює сумі миттєвих потужностей окремих джерел.

2. Обговорюється процес, коли електрична енергія необоротно перетворюється на іншу форму енергії.

Сила цього процесу $\left[\int_V \left(\bar{E} + \bar{E}_{\text{стор2}} \right) dV \right]$, яка, наприклад, наочно

зображена у теорії електричних кіл у процесі перетворення електричної енергії на теплову, вимірюється через миттєву активну потужність

$$p = \sum_1^n i_k^2 r_k \text{ або } p = \sum_1^n u_k^2 g_k, \quad (1.7)$$

тут r вказує на активний опір в момент споживання; $g = 1/r$ відображає активну провідність в момент споживання. З погляду математики, миттєва

споживана потужність $p(t)$ за формулою (1.7) завжди буває позитивною функцією часу. Ця властивість не підлягає змінам, незалежно від форми та знаку струму і напруги.

3. Здатність системи тимчасово запасати електричну енергію.

Другий інтеграл у правій частині рівняння (1.5) для електричного кола, що має ланцюги з потокозчепленням ψ магнітного поля та заряду Q електричного поля, підкреслює, що миттєва потужність кола

$$q = \sum_1^n \left[i_{Lk} \frac{d\psi_k}{dt} + u_{Ck} \frac{dQ_k}{dt} \right] \quad (1.8)$$

або

$$q = \sum_1^n \left[L_k i_{Lk} \frac{di_{Lk}}{dt} + C_k u_{Ck} \frac{du_{Ck}}{dt} \right], \quad (1.9)$$

$$\text{де } L_k = \frac{\psi_k}{i_{Lk}}; C_k = \frac{Q_k}{u_{Ck}}.$$

Параметр q відображає швидкість зміни енергії, що тимчасово накопичується в індуктивних і ємкісних пристроях, а отже він представляє миттєву потужність обмінних енергетичних процесів у цій системі. З рівнянь (1.8) і (1.9) також слідує, що тимчасова залежність цього параметра є завжди змінюваною функцією знаку.

Енергетичний баланс в процесі, що формулюється за співвідношеннями (1.6)–(1.8), являє собою математичний варіант запису балансу миттєвих потужностей для окремої системи, а саме

$$\sum_1^n s_{k \text{ дж}} = \sum_1^n s_{k \text{ спож}},$$

$$\text{де } \sum_1^n s_{k \text{ дж}} = \sum_1^n u_k i_k; \quad \sum_1^n s_{k \text{ спож}} = \sum_1^n p_k + \sum_1^n q_k; \quad u_k, i_k - \text{це напруга і}$$

струм k -го джерела електричної енергії.

Це рівняння демонструє, що загальна миттєва потужність усіх джерел енергії в електричному колі складається з двох частин: $\sum_1^n p_k$ – суми миттєвих активних потужностей, які відносяться до процесу необоротного споживання електричної енергії в даній системі, і $\sum_1^n q_k$ – сума миттєвих потужностей обміну, які не відображають процесу споживання, але що характеризують тільки оборотний процес запасання та віддачі енергії в індуктивних і ємкісних пристроях.

Питання розкладання миттєвої потужності ставить на перший план представлення енергії у замкнутій електричній системі $s = s(t)$ приймача електричної енергії відділяють на миттєву потужність $p = p(t)$, відповідність якої є просуванню енергії і миттєва потужність $q = q(t)$, що є показником обмінних дій при вході цього приймача. Розв'язання цього питання йде на користь перш за все правильності оцінки енергетичної доцільності роботи відповідних електричних кіл через співвідношення [25]

$$K_{\text{сп}} = \frac{W_0}{W_0 + W_{\sim}}, \quad (1.10)$$

де $W_0 = \int_0^{\tau} p dt$ – енергія, яку сегмент кола споживає протягом часового проміжку τ ;

$$W_{\sim} = \int_0^{\tau} |q| dt \quad \text{– енергія, що репрезентує обмінний процес на цьому}$$

сегменті протягом того ж часу.

Коефіцієнт $K_{\text{сп}}$ (коефіцієнт електричного споживання) демонструє, яка частка всієї енергії у сегменті кола необоротно споживається, тобто бути корисно використаною. Для кіл, де складається лише споживання електричної

енергії, $K_{\Pi} = 1$. Для кіл, де присутній тільки обмін або зберігання енергії, $K_{\Pi} = 0$. Всі інші випадки є проміжними.

На відміну від відомих коефіцієнтів, які оцінюють передачу енергії споживачу через аналіз її потоків додатних і від'ємних напрямків, вираз K_{Π} апроксимує процес приходу енергії від джерела до кола споживання як активною (необоротно спожитою) і обмінною (що тимчасово запасасться) складовими, з яких кожна функціонує відповідно до вхідних змінних $u(t)$ і $i(t)$ приймача електричної енергії. Цей фактор дозволяє застосувати критерій K_{Π} для оцінки обмінних процесів у більш загальних ситуаціях при будь-яких формах графіків напруги та струму, також при нелінійностях у колах споживання і, зокрема, за умов періодичної напруги і струму, що містить сталий компонент.

Проаналізуємо реалізацію цих теоретичних положень.

Припустімо, послідовне R–L коло виставлено до нашого розгляду (рис. 1.4,а). Тоді

$$u = Ri + L \frac{di}{dt} = Ri + Li' \quad (1.11)$$

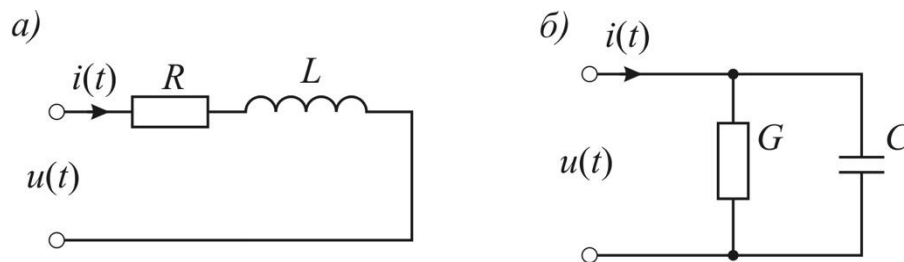


Рис. 1.4. Схематичне зображення електричних кіл:

а – послідовне R-L кільце, б – паралельне G-C кільце

Миттєвий опір $Z = u / i = R + Li' / i$. Величина $i' / i = v(i)$ описує обмінний процес між індуктивним накопичувачем і колом, так що з енергетичної точки зору $v(i)$ можна назвати обмінною характеристикою кола, а величину $Lv(i) = X$ обмінним опором накопичувача. Таким чином, наступна рівноправність є справедливою

$$Z = R + Lv(i) = R + X ,$$

де у загальних термінах $R = R(i) = R(t)$ та $X = X(i) = X(t)$ – оцінка активного і обмінного елементів повного опору Z , маємо те, що активний опір R є парним елементом функції $Z[v(i)]$, а обмінний опір X – непарним елементом $Z[v(i)]$.

Отже, отримання характеристик двополюсника, який включає активний опір R та індуктивний накопичувач L , полягає в розкладанні функції $Z[v(i)]$ на парну та непарну частини, замінюючи в формулі $Z(t) = u(t) / i(t)$ тимчасову змінну t на нову $v(t)$, яка після розділення функції $Z[v(i)]$ на компоненти $R[v(i)]$ та $X[v(i)]$ замінюється на t

Те саме стосується двополюсника, який включає паралельно підключений споживач $G = 1/R$ та ємнісний накопичувач електроенергії C (рис. 1.4,б), отримуємо

$$Y = G + Cv(u) = G + b ,$$

де $v(u) = u' / u$ є обмінна характеристика напруги кола, при цьому $v(u) > 0$ зростає з наростанням електричної енергії елемента C , $dW_{\text{ел}} / dt > 0$ і від’ємна ($v(u) < 0$) при $dW_{\text{ел}} / dt < 0$, в такому випадку $G = G(u) = G(t)$ дорівнює миттєвій активній провідності кола, тоді як $b = b(u) = b(t)$ представляє її миттєву обмінну провідність. Варто зазначити, що G і b відповідають парній і непарній частинам $Y[v(u)]$.

Таким чином, в результаті розкладання вхідної тимчасової функції двополюсника на активну і обмінну частини ми отримуємо реалізацію простих електричних кіл, які включають послідовно підключені елементи R і L або паралельно підключені G і C , при цьому кожна з цих схем містить лише один накопичувач, резерв енергії якого при стабільних параметрах L і C визначається значенням напруги (для G – C кіл) та сили струму (для R – L кіл),

при цьому інтенсивність обмінного процесу характеризується відповідними функціями $v(i)$ або $v(u)$.

Розглянемо встановлення параметрів довільного двополюсника на основі заданих часових характеристик. Для цього спершу визначимо його тип. Відомо, що ознакою індуктивного кола є відношення

$$\left. \frac{u}{i'} \right|_{t=t_1} > 0,$$

де t_1 – це будь-який корінь рівняння $i(t) = 0$.

Для простих вхідних тимчасових функцій напруги і струму $u = U_m \sin(\omega t + \varphi)$ та $i = I_m \sin(\omega t)$ ми отримаємо

$$\left. \frac{u}{i'} \right|_{t=t_1} = \frac{U_m \sin \varphi}{I_m \omega},$$

де $t_1 = 0$ – це корінь рівняння, отже, кут φ визначає характеристику двополюсника. Коли кут φ змінюється від нуля до 2π , ми отримуємо наступні формули для послідовного R–L кола (рис. 1.5):

$$R = R_m \cos \varphi; L = L_m \sin \varphi,$$

$$\text{де } R_m = U_m / I_m; L_m = U_m / (\omega I_m).$$

Маємо наступне для паралельного G–C кола:

$$G = G_m \cos \varphi; C = -C_m \sin \varphi,$$

$$\text{де } G_m = I_m / U_m; C_m = I_m / (\omega U_m).$$

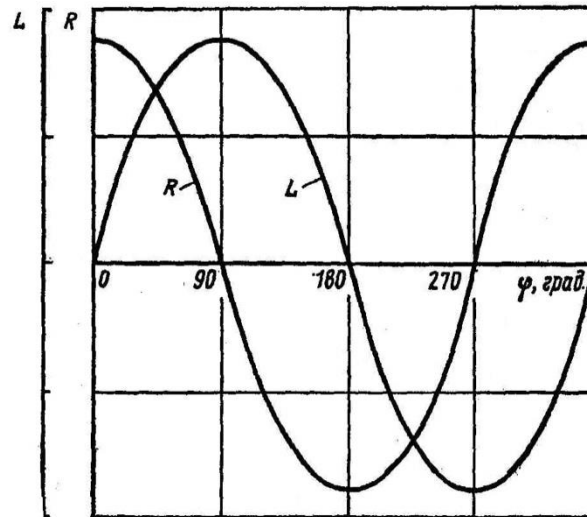


Рис. 1.5 Залежність параметрів R – L кола від кута φ

Параметри R , L , G , C двополюсника можуть бути як позитивними, так і негативними. Негативні значення R і G свідчать про потребу вставки в коло додаткових джерел енергії для виконання вхідних функцій. Умовами роботи кола в області ємнісного ефекту (III–IV квадрант) визначаються від'ємні значення індуктивності L , від'ємні значення ємності C визначаються умовами роботи кола в області індуктивного ефекту (I–II квадрант).

У ситуаціях, коли відсутні аналітичні вирази тимчасових функцій напруги і струму, для визначення параметрів двополюсників треба дотримуватися наступного порядку.

Розглянемо рівняння (1.11) для двох моментів часу t_1 і t_2 , які повинні відповідати умові для періодичних функцій $u(t)$ і $i(t)$:

$$\begin{aligned} u(t_1) &= r[i(t_1)]i(t_1) + L[i(t_1)]i'(t_1); \\ u(t_2) &= r[i(t_2)]i(t_2) + L[i(t_2)]i'(t_2). \end{aligned} \quad (1.12)$$

Проте $r[i(t_1)] = r[i(t_2)] = r(1)$; $L[i(t_1)] = L[i(t_2)] = L(1)$.

Очевидно

$$u(t_1) - u(t_2) = L[i(t_1)](i'(t_1) - i'(t_2)) \quad (1.13)$$

тому отримуємо наступні результати

$$L(1) = [u(t_1) - u(t_2)] / [i'(t_1) - i'(t_2)]; \quad (1.14)$$

$$R(1) = [u(t_1) - L(1)i'(t_1)] / i(t_1). \quad (1.15)$$

Після цього ми переходимо до двох інших моментів часу, які відповідають вищезазначеним умовам, і процес продовжується

Описаний метод використовується для подання складної нелінійної схеми з елементами перемикачів у вигляді простого R–L кола, де параметри R і L можуть бути представлені як функціями часу, так і функціями струму.

В якості прикладу розглянемо обчислення параметрів перетворювального електровозу. Щоб отримати залежності $u = u(t)$ і $i = i(t)$, спершу проаналізуємо електромагнітні процеси в тягових мережах змінного струму з урахуванням наявності одного перетворювального електровоза. Постійний режим роботи кола розраховується на основі аналізу перехідного процесу в системі джерело – система електропостачання – електровоз при нульових початкових умовах. Характеристики всіх нелінійних елементів вносимо у рівняння електричної рівноваги, які описують електромагнітні процеси в системі аналітичними формулами. Наприклад, для електровоза змінного струму, що розташований на відстані 25 км. від тягової підстанції (рис.1.6), матричне рівняння стану виглядає так

$$\|e\| = \|R\| \|i\| + \|L\| \left\| \frac{di}{dt} \right\| + \|u_e\|, \quad (1.16)$$

де $\|e\|$, $\|u_e\|$, $\|i\|$, $\|di/dt\|$ – матриці-стовпці е.р.с. контурів, напруги на вентиллях, контурних струмів та їх похідні відповідно; $\|R\|$, $\|L\|$ – квадратні матриці опорів та індуктивностей контурів.

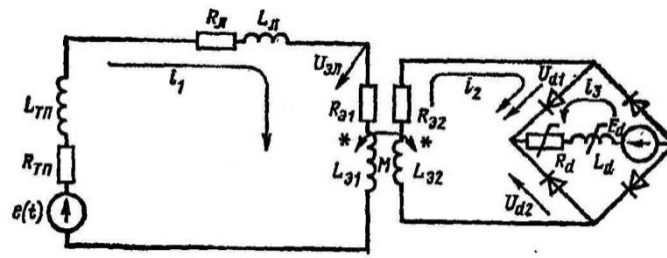


Рис. 1.6. Схема системи електропостачання з одним електровозом

Передаючи рівняння (1.16) до форми, що зручна для числового інтегрування, ми маємо:

$$\left\| \frac{di}{dt} \right\| = \|L\|^{-1} (\|e\| - \|R\| \|i\| - \|ui\|). \quad (1.17)$$

Матричне рівняння (1.17) представляє собою стандартну систему диференціальних рівнянь, для розв'язання якої застосовується метод Рунге-Кутта.

На основі даних розрахунків були побудовані часові функції миттєвих величин струму і напруги на струмоприймачі електровоза (рис. 1.7). Струм електровоза відстає за фазою від напруги, що значно впливає на його третю гармонійну складову.

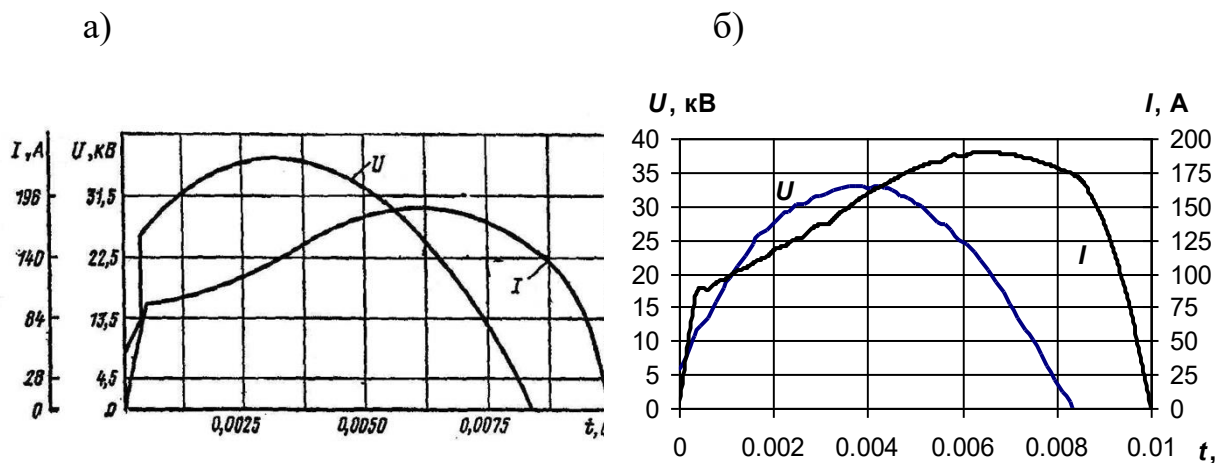


Рис. 1.7: Криві миттєвих значень струму і напруги на вході електровоза:

а – теоретичні значення, б – експериментальні дані

Криві миттєвих значень струму і напруги використовуються як вхідні функції двополюсника R–L для встановлення еквівалентних параметрів

двоелементного кола згідно з наведеною вище методикою, відповідно до формул (1.5)–(1.8). В результаті вираховуються миттєві величини активних і обмінних характеристик електровоза як функції струму (рис. 1.8), а також часу. З рис. 1.8 випливає, що протягом інтервалу комутації, коли всі вентиляльні елементи відключені, струм електровоза обмежений приведеними параметрами трансформатора електровоза (R , L постійні і не змінюються з точки зору протікаючого струму). При завершенні перехідного процесу в вентилях еквівалентні R і L раптово змінюються до величин, що відповідають старту зони провідності, і потім поступово змінюються.

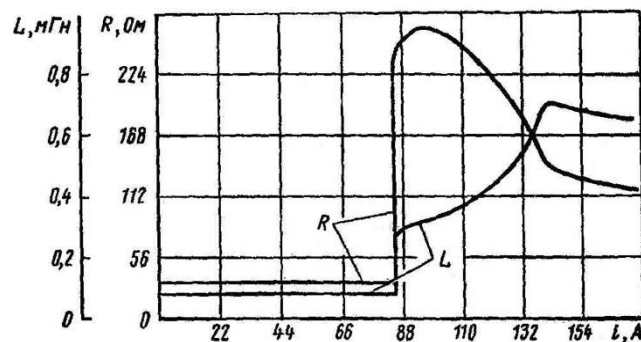


Рис. 1.8: Криві миттєвих значень активних і обмінних характеристик електровоза, що залежать від вхідного струму електровоза

Адекватність двополюсника розрахункової моделі перевірена підстановкою значень функцій $R = R(i)$ і $L = L(i)$ в рівняння (1.5) для кожного проміжку часу t . В такий спосіб є відновлена початкова функція часу $u = u(t)$ із урахуванням помилки менше 0,5%.

Проаналізувавши нелінійні кола з вентиляльними приладами (такими як електровози, тягові трансформатори, тощо) можна визначити миттєві характеристики цих пристроїв по заданим режимам роботи, завдяки представленому способу синтезу їх електричних характеристик $R(i)$, $L(i)$ чи $R(t)$, $L(t)$.

Отже, під час складання математичних моделей необхідно враховувати пристрої електричної тяги, використовуючи отримані активні та обмінні характеристики. Миттєві характеристики R-L і G-C кіл варто об'єднати в систему рівнянь, що базуються на принципах теорії чотириполіусників [9]. Схема цього чотириполіусника в універсальному вигляді представлена на рис. 1.9.

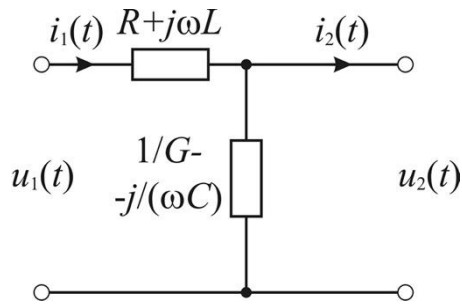


Рис. 1.9. Схема заміщення чотириполіусника

За наявності миттєвих характеристик навантаження бажано використати А-форму запису рівнянь чотириполіусника

$$\begin{aligned} u_1(t) &= A u_2(t) + B i_2(t), \\ i_1(t) &= C u_2(t) + D i_2(t). \end{aligned}$$

Підставляючи у прийняту схему заміщення чотириполіусника значення коефіцієнтів у загальному форматі, ми одержуємо відповідну систему рівнянь

$$\begin{aligned} u_1(t) &= \left[1 + \frac{R + j\omega L}{\frac{1}{G} - \frac{j}{\omega C}} \right] u_2(t) + [R + j\omega L] i_2(t), \\ i_1(t) &= \left[\frac{1}{\frac{1}{G} - \frac{j}{\omega C}} \right] u_2(t) + i_2(t). \end{aligned}$$

2. ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ДІЛЯНКИ КОРИСТІВКА–БУРТИ– КРЕМЕНЧУК

2.1. Оцінка параметрів споживання електроенергії на тягових підстанціях

Проведені експерименти з вимірювання параметрів енергоспоживання виконувались на трьох підстанціях одразу: Знам'янка, Олександрія, П'ятихатки.

Ціль цих вимірювань полягає в оцінці параметрів компенсуючого пристрою з метою зменшення споживання реактивної потужності та вдосконалення режиму напруги на шинах з напругою 27,5 кВ тягової підстанції Олександрія, у зв'язку з електрифікацією ділянки Користівка – Кременчук.

На підставі отриманих даних було проведено розрахунки пропускної здатності на ділянці Користівка – Кременчук, виконані за допомогою методології [10].

Під час вимірювань були використані переносні аналізатори якості електричної енергії, виготовлені на заводі SATEC (Ізраїль), обладнані кліщами Роговського:

1. PNA-296, зав. № 260513 Котовської дистанції електропостачання;
2. PNA-296, зав. № 218855 ТОВ «ХТЕ» (м. Київ);
3. EDL-175хг, зав. № 723789 Знам'янської дистанції електропостачання;а
4. EDL-175хг, зав. № 725151 Долинської дистанції електропостачання;
5. EDL-175хг, зав. № 723096 ДНУЗТ;
6. Парма, зав. № 00220 Основ'янської дистанції електропостачання (м.Харків);
7. Fluke 43В № DM8430276 ДЕЛ Львівської залізниці.

Приєднання приладів було здійснено у колах комерційного обліку, трансформаторах струму та напруги 27,5 кВ тягових трансформаторів, які перебували в роботі. Час проведення експерименту становив 24 години, інтервал реєстрації – 1,0 с.

Режим роботи компенсуючих пристроїв під час проведення вимірювань відповідав стандартному налаштуванню: на тяговій підстанції Знам'янка - компенсуючий пристрій включено в фазу «b», на тяговій підстанції Олександрія - також включено в фазу «b», на ПСК Щаслива - вимкнено, на ПСК Аліївка - компенсуючий пристрій не передбачено (рис. 2.1).

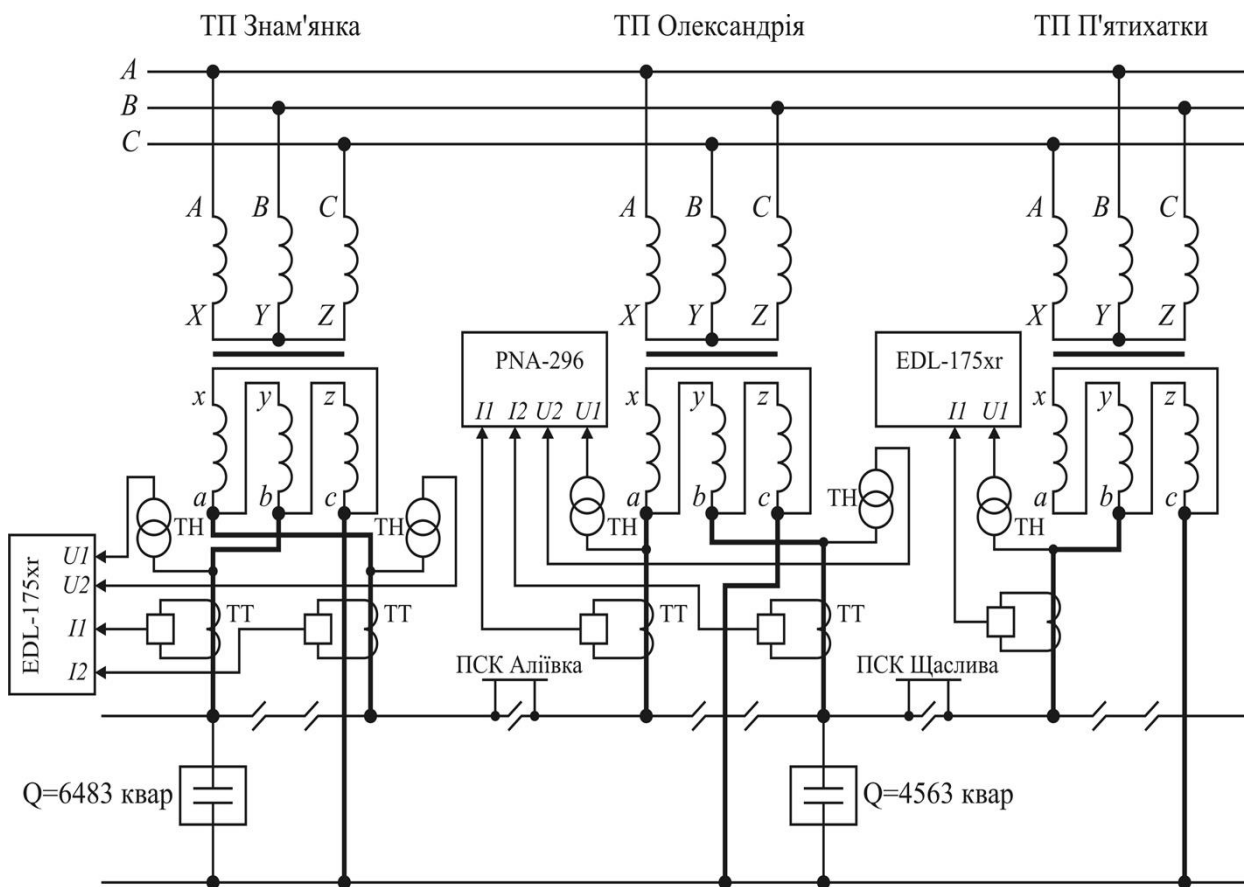


Рисунок 2.1: Схематичне представлення вимірювань на ділянці електропостачання

Обробка даних, які узяті з урахуванням схеми підключення та застосованих приладів вимірювання, привела до таких результатів.

Трансформаторна підстанція «Знам'янка»:

- частота напруги 27,5 кВ була в діапазоні від 49,94 Гц до 50,05 Гц;

- напруга в фазах «а» та «b» варіювалася від 24,998 кВ до 27,753 кВ та від 25,482 кВ до 28,118 кВ відповідно;
- струми у лініях живлення були в межах 0..572 А (фаза «а») та 0..652 А (фаза «b»), з середніми показниками 162 А та 271 А;
- показники спотворення синусоїдальності напруги для кожної фази змінювалися в рамках 1,4..9,7 % та 1,7..6,7 %, а в середньому складали 4,4 % та 3,75 %;
- показники спотворення синусоїдальності струму в середньому становили 42 % та 24,7 %, були спостереження пікових відхилень до 500-800 % , але їх загальний вплив є незначним;
- показники активної потужності варіювалися від -1536 кВт (генерація) до 12236 кВт (споживання) та від -1411 кВт (генерація) до 13767 кВт (споживання) за фазами «а» та «b»;
- показники реактивної потужності варіювалися від -2696 квар (генерація) до 6963 квар (споживання) та від -1981 квар (генерація) до 9875 квар (споживання) за фазами «а» та «b»;
- перелік вищих гармонічних складових напруги представлений для фази «а» таким рядом: 5 (2,78 %), 7 (1,97 %), 3 (1,41 %), 9 (0,74 %), 11 (0,62 %), 13 (0,3 %);
для фази «b» ряд наступний: 5 (2,46 %), 3 (1,71 %), 7 (1,59 %), 11 (0,61 %), 9 (0,52 %), 13 (0,28 %);
- перелік вищих гармонічних складових струму представляється для фази «а» таким чином: 3 (30,9 %), 5 (13,5 %), 7 (6,82 %), 9 (3,75 %), 11 (2,19 %), 13 (1,4 %);
для фази «b» так: 3 (17,9 %), 5 (7,36 %), 7 (2,50 %), 9 (1,75 %), 11 (1,07 %), 13 (0,71 %).

Трансформаторна підстанція Олександрія:

- границі частоти напруги 27,5 кВ простягались від 49,95 Гц до 50,05 Гц;

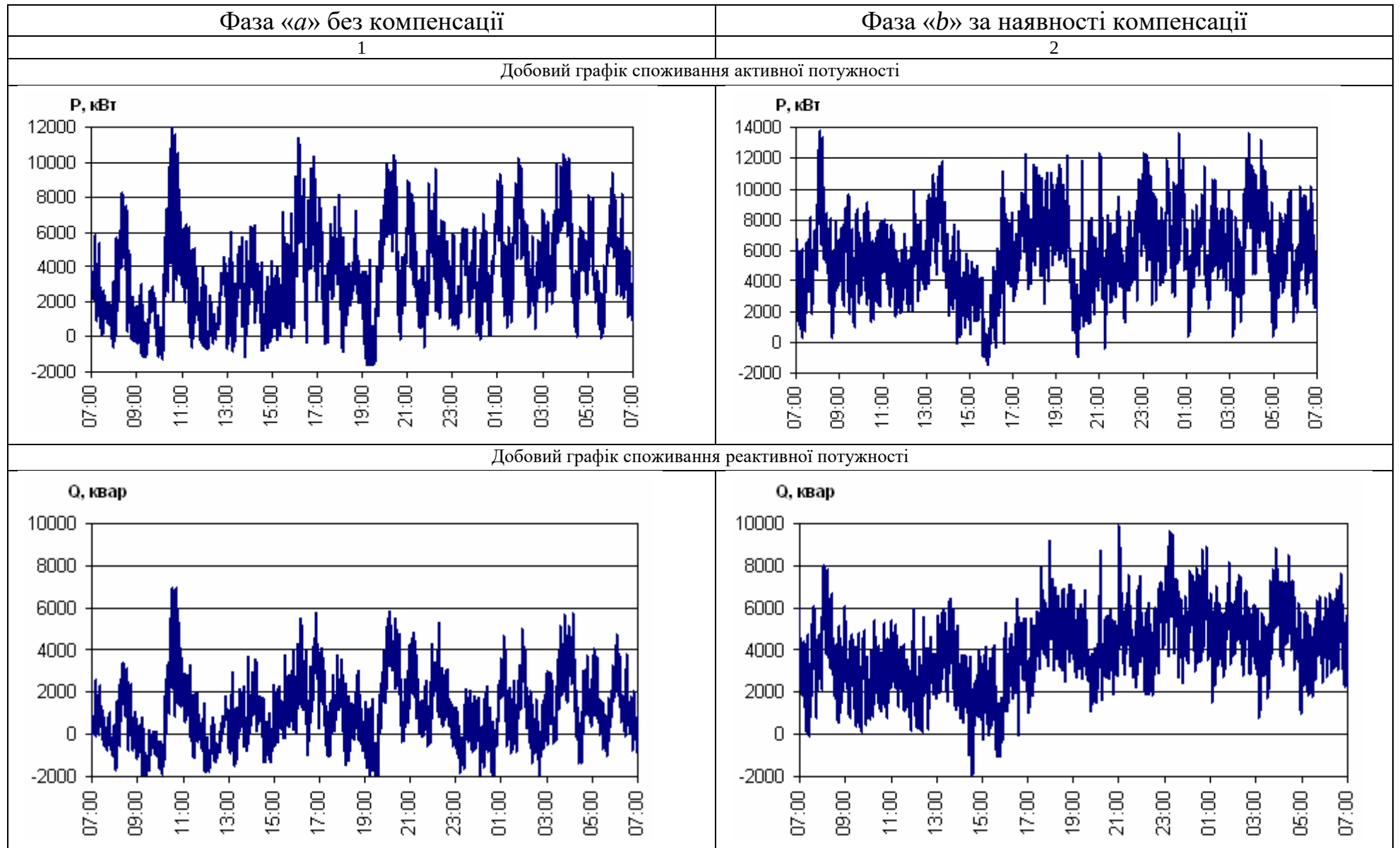
- рівні напруги у фазах «а» та «b» мінялися в межах від 25,627 кВ до 28,332 кВ та від 26,698 кВ до 28,794 кВ відповідно;
- рівні струму плечей живлення варіювались між 68,5..935 А (фаза «а») та 15,4..515 А (фаза «b»), середні перераховані радіуси виявились 360 А та 194 А;
- коефіцієнти деформації синусоїди напруги для кожної фази варіювались в межах 1,6..9,2 % та 1,1..6,5 %, у середньому виявились 4,4 % та 3,08 %;
- середні коефіцієнти деформації синусоїди струму складають 16,7 % та 24,3 %;
- інтенсивність активної потужності по фазам «а» та «b» зазнала зміни в границях від 620 кВт до 19671 кВт та від -470 кВт (генерація) до 13216 кВт (спожито) у відповідному порядку;
- інтенсивність реактивної потужності по фазам «а» та «b» коливалась в межах від 141 квар до 13386 квар та від -5374 квар (генерація) до 4267 квар (споживання) відповідно ;
- набір величин вищих гармонік напруги представлений у такому вигляді
фаза «а»: 5 (3,03 %), 3 (1,86 %), 7 (1,80 %), 9 (0,77 %), 11 (0,71 %), 23 (0,58 %);
фаза «b»: 5 (2,20 %), 7 (1,40 %), 23 (0,76 %), 3=9 (0,57 %), 21=25 (0,55 %);
- набір величин вищих гармонік струму представлений у такому вигляді
фаза «а»: 3 (15,1 %), 5 (7,05 %), 7 (3,53 %), 9 (1,84 %), 11 (0,98 %), 13 (0,68 %);
фаза «b»: 3 (21,9 %), 5 (6,13 %), 7 (3,95 %), 9 (2,58 %), 11 (1,3 %), 23 (1,16 %).

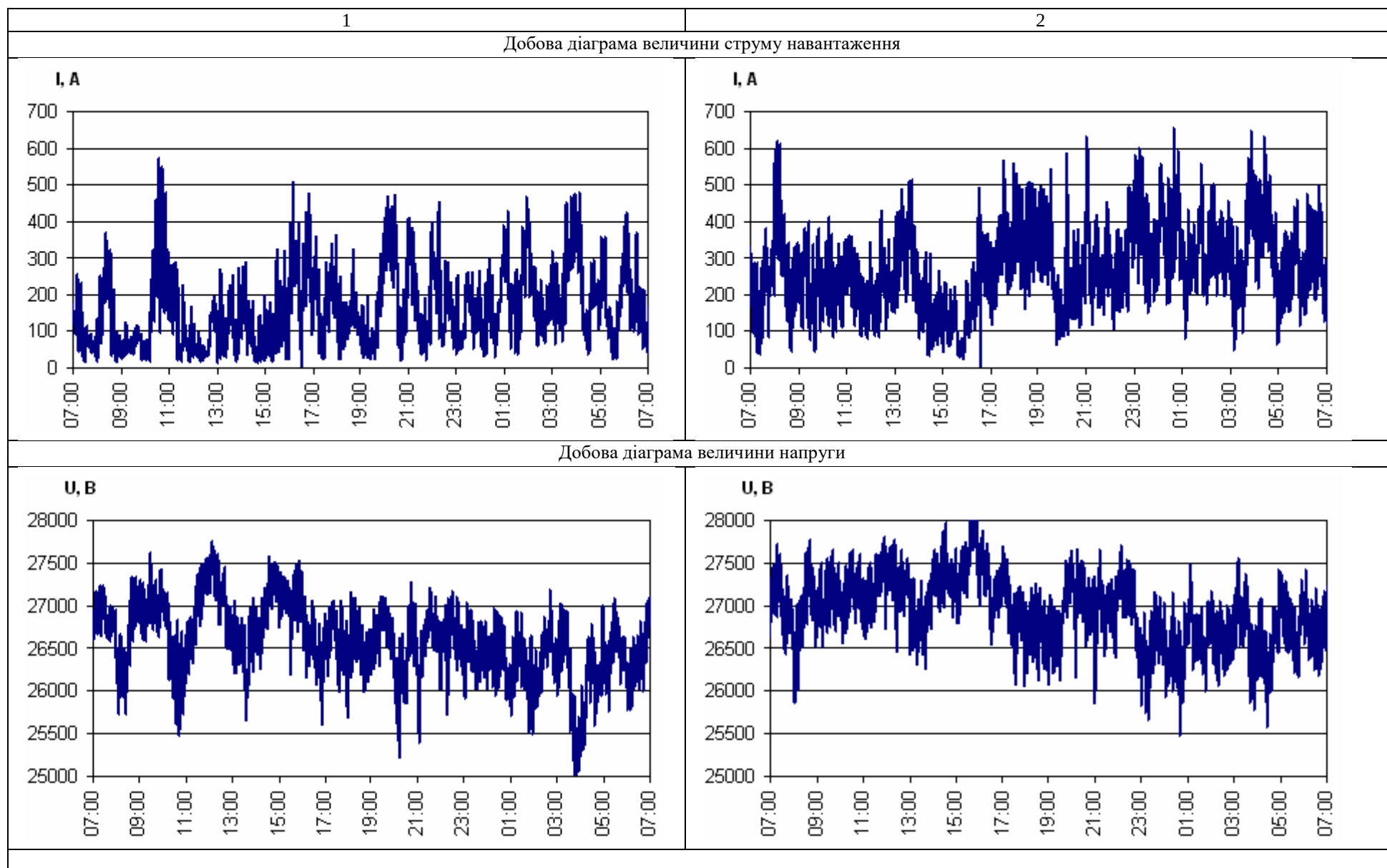
Трансформаторна підстанція П'ятихатки:

- діапазон частоти напруги 27,5 кВ складав від 49,95 Гц до 50,04 Гц;
- інтенсивність напруги змінювалась в межах від 25,133 кВ до 27,559 кВ, середнє типове значення — 26,721 кВ;
- струм у плечі живлення характеризується діапазоном 29,3..648 А, середнє перераховане значення складає 201 А;
- коефіцієнт спотворення синусоїди струму коливався у межах від 1,7..9,8 %, середнє типове значення — 4,4 %;
- середній рівень деформації синусоїди струму виходив 28,7 %, в процесі зміни від 15,1 % до 82,1 %;
- інтенсивність активної потужності коливалась від -893 кВт (згенеровано) до 13294 кВт (спожито), середнє типове значення складає 3794 кВт;
- інтенсивність реактивної потужності коливалась в межах від 418 квар до 9544 квар, в середньому 3360 квар;
- ряд значень вищих гармонік напруги представляється таким чином 5 (2,32 %), 3 (2,28 %), 7 (1,37 %), 23 (1,3 %), 25 (1,0 %), 9 (0,84 %), 13 (0,81 %);
- ряд значень вищих гармонік струму представлений таким чином 3 (21,5 %), 5 (11,5 %), 7 (5,0 %), 9 (2,45 %), 11 (1,84 %), 23 (1,59 %), 13 (1,2 %).

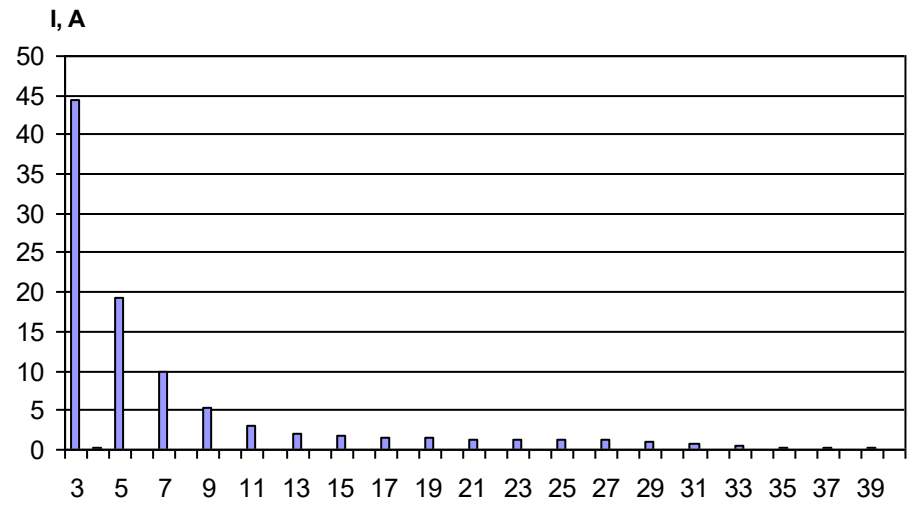
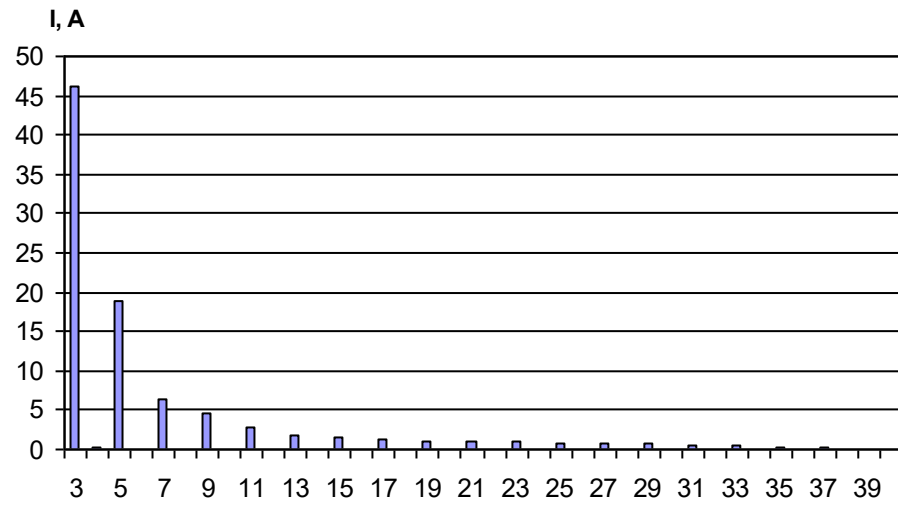
Нижче наведено добові діаграми використання активної і реактивної електроенергії, струмів напруги, величини напруги вузлів живлення, а також середні показники вищих гармонічних компонентів струму і напруги за приєднанням 27,5 кВ.

ТП Знам'янка

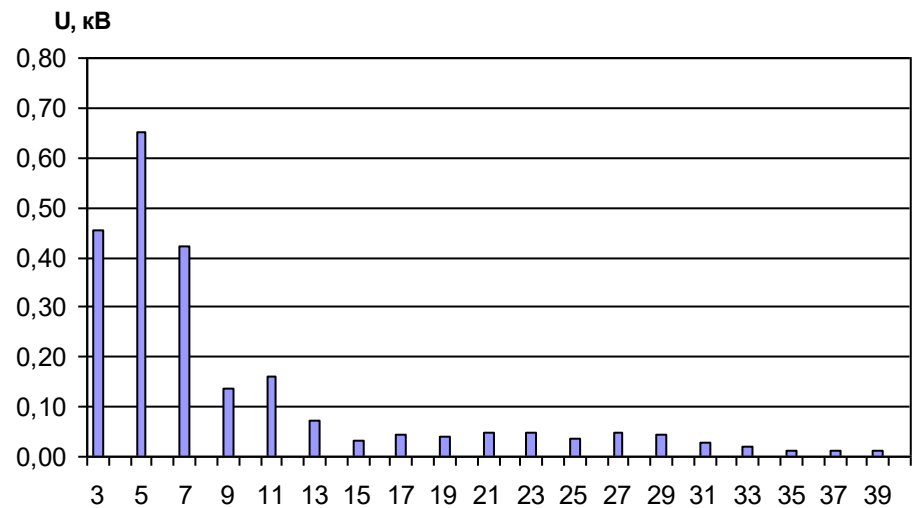
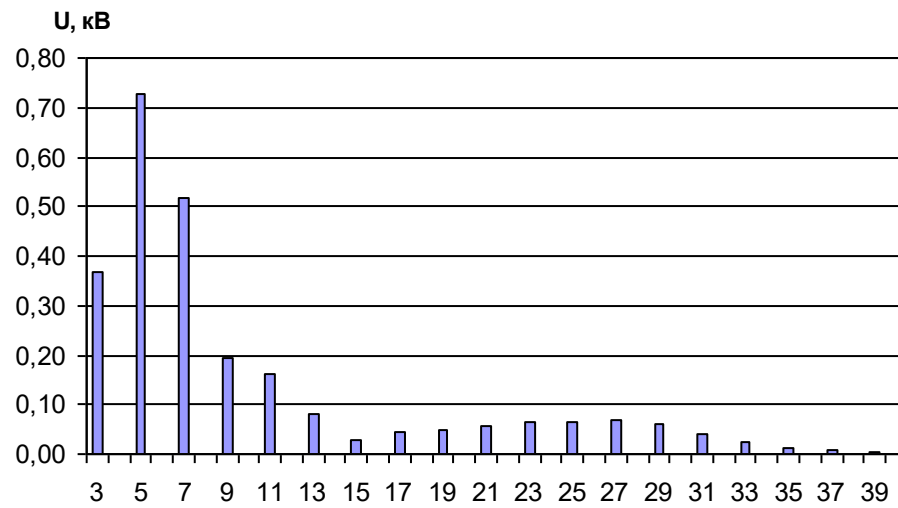




Середні показники вищих гармонійних компонентів струму



Середні показники вищих гармонійних компонентів напруги



2.2. Електротяговий розрахунок

Для встановлення рівня напруги на струмоприймаючому пристрої електровоза під час руху електрифікованою зоною між Користівкою та Кременчуком в парному і непарному напрямках проводимо розрахунок електротягового навантаження. Початковими даними для цього розрахунку будуть:

- профіль ділянки Користівка – Кременчук за довжиною (рис. 2.2);
- маса вантажного поїзда - 5000 т, пасажирського - 1200 т;
- модель електровозу - ВЛ80

На рис. 2.2 зображено профіль довжиною ділянки між Користівкою та Кременчуком.

Початкову координату станції Кременчук в обчисленнях беремо за нульовий кілометр.

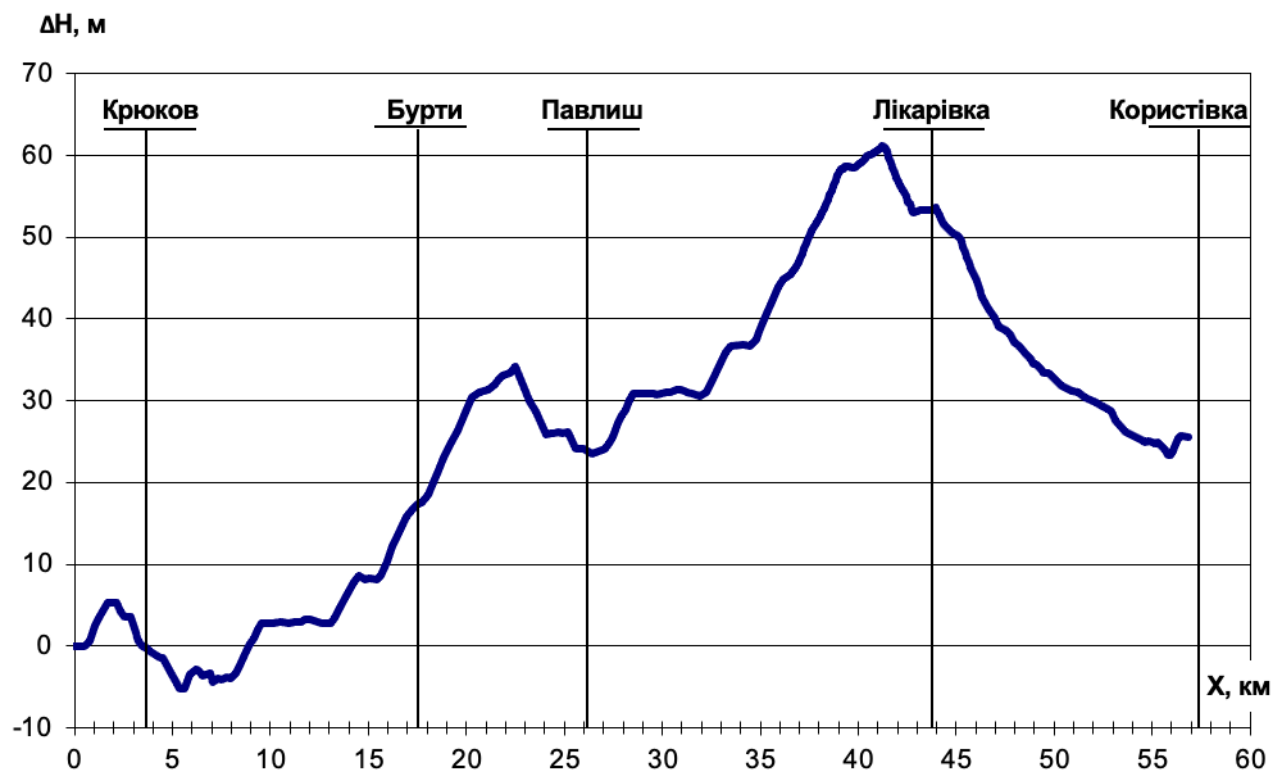


Рис. 2.2. Профіль ділянки Користівка – Кременчук після проведення реконструкційних робіт

На рис. 2.3 – 2.6 наведено дані тягових розрахунків для поїздів вагою 5000 т. та 1200 т. в парному (до ст. Кременчук) і непарному (до ст. Користівка) напрямках.



Рис. 2.3. Визначення тяги поїзда 5000 т для непарного напрямку

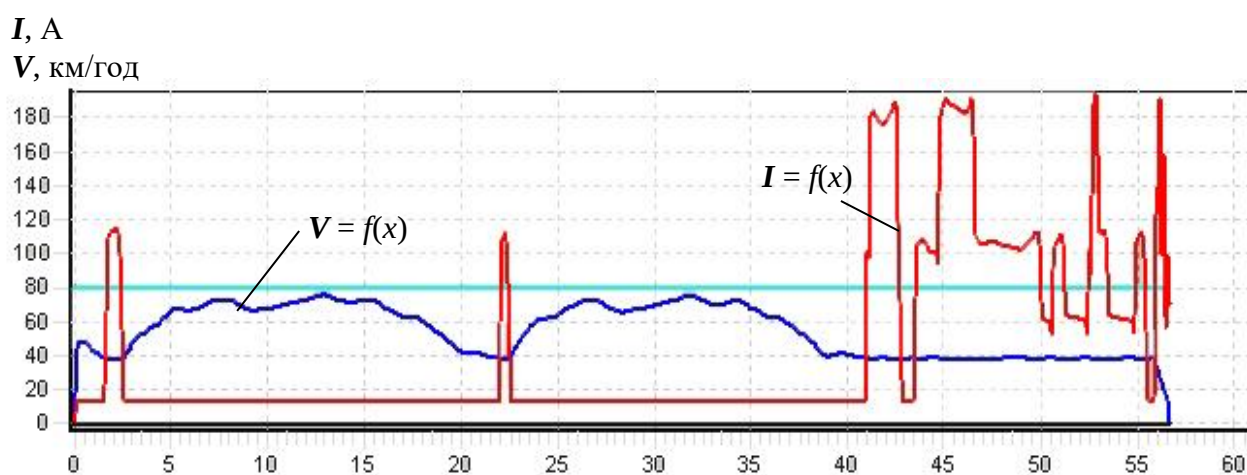


Рисунок 2.4. Визначення тяги поїзда 5000 т для парного напрямку



Рисунок 2.5. Тягові характеристики поїзда 1200 т для непарного напрямку

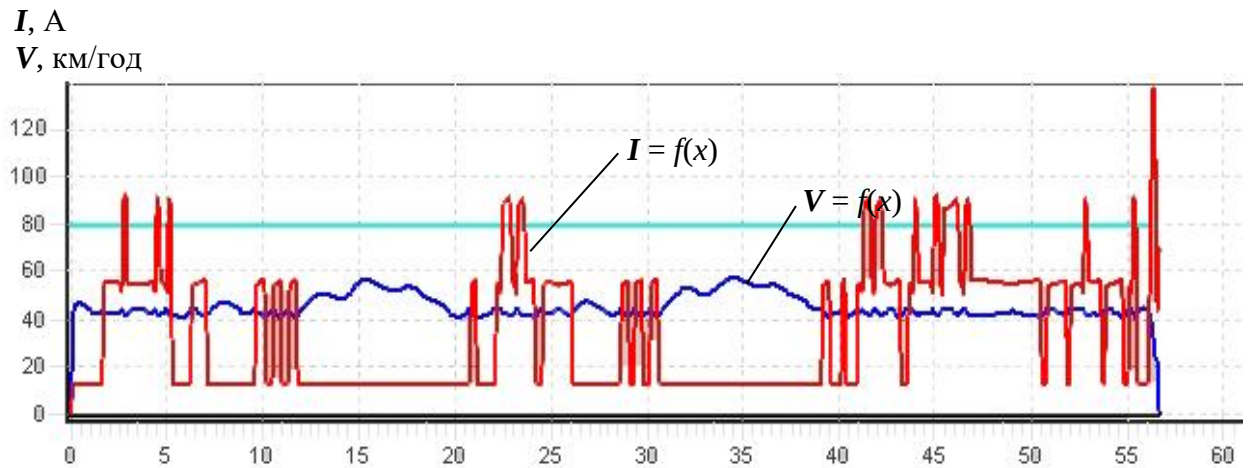


Рисунок 2.6. Тягові характеристики поїзда 1200 т для парного напрямку

2.3. Моделювання режимів роботи системи електропостачання

Ціль моделювання - встановити реальну пропускну здатність ділянки до початку використання тягової підстанції на ст. Кременчук.

Пропускна спроможність ділянки електрифікованої залізниці встановлюється за допомогою максимальної кількості поїздів, які можна пропустити протягом певного часу. Пропускна спроможність встановлюється за допомогою мінімального інтервалу θ_d між поїздами

$$N = \frac{T}{\theta_d},$$

де T – визначений період часу (для $T = 1440$ хв);

θ_d – мінімальний інтервал між поїздами, хвилин.

Визначення θ_d здійснюється згідно з величиною напруги на обмежуючому блок-відрізку. Олександрійська тягова підстанція живить відрізок Користівка–Кременчук, а обмежуючий блок-відрізок розташовується в кінці зони електропостачання.

Із моделювання графіка руху потягів ми визначимо таке значення θ_d , при якому рівень напруги на обмежуючому блок-відрізку не буде нижчим за приписану норму ПТЕ (21 кВ).

Вихідними даними для розрахунків будуть:

- 1) застосуємо залежність напруги на шинах тягової підстанції Олександрія (середнє значення 27,131 кВ, стандартне відхилення 400,6 В);
- 2) врахуємо результати тягових розрахунків для товарних потягів з вагою 5000 т та пасажирських з вагою 1200 т;
- 3) тип контактної підвіски ПБСМ1-95+МФ-100;
- 4) врахуємо мережу Р-65;
- 5) довжина відрізка 58,8 км (з фідерами 70,8 км).

Розглянемо декілька варіантів переходу потягів цією ділянкою:

1. пропускаються виключно непарні потяги з вагою 5000 т.;
2. пропуск непарних та парних пасажирських потягів 1200 т.;
3. одночасний пропуск непарних потягів з вагою 5000 т. и парних пасажирських з вагою 1200 т.;
4. одночасний пропуск парних потягів з вагою 5000 т. та непарних з вагою 1200 т.;
5. одночасний пропуск як парних так і непарних потягів з вагою 5000 т.

Табл. 2.1 Показники обчислення напруги на обмежуючому блок-відрізку

Варіант	θ_d , хв (непар/пар)	Кількість потягів в зоні (непар/пар)	$U_{\min}$, кВ	Згідність норми ПТЕ
1-й варіант				
1	10 / –	2 / 0	17,773	не відповідає
1	15 / –	2 / 0	17,138	не відповідає
1	20 / –	2 / 0	18,000	не відповідає
1	30 / –	2 / 0	20,008	не відповідає
1	40 / –	2 / 0	19,626	не відповідає
1	50 / –	2 / 0	19,022	не відповідає
1	55 / –	2 / 0	20,926	відповідає
1	60 / –	2 / 0	20,949	відповідає
2-й варіант				
2	10 / 10	2 / 2	22,687	відповідає
2	10 / 10	3 / 3	21,010	відповідає
2	10 / 10	4 / 4	19,815	не відповідає
3-й варіант				
3	55 / 10	2 / 1	20,589	відповідає
3	55 / 10	2 / 2	30,312	не відповідає
3	55 / 10	1 / 2	21,028	відповідає
4-й варіант				
4	10 / 10	2 / 2	23,138	відповідає
4	10 / 10	3 / 3	21,517	відповідає

продовження таблиці 2.1

Опція	$\theta_{\text{Д}}$, хв (парні/непарні)	Кількість поїздок в зоні (парні/непарні)	U_{min} , кВ	Згідність норми ПТЕ
4	10 / 10	4 / 4	20,314	не відповідає
Варіант 5				
5	55 / 10	2 / 2	20,770	не відповідає
5	55 / 20	2 / 2	20,804	не відповідає
5	55 / 25	2 / 2	20,911	відповідає

2.4. Висновки дослідів короткого замикання на ділянці

Згідно з спеціально розробленою програмою, зусиллями Знам'янської дистанції електропостачання (ЕЧ-3), було проведено дослід короткого замикання на ділянці для контролю правильності налаштування пристроїв релейного захисту.

Програма передбачала проведення чотирьох тестів короткого замикання:

1. Консольна схема живлення, місце встановлення заземлюючої штанги ОП №23 284пк8 ст. Павлиш (рис. 2.7);
2. Петлева схема живлення, к. з. на ст. Павлиш 284пк8 (рис. 2.8);
3. Консольна схема живлення, місце встановлення заземлюючої штанги 262пк7 головна колії ст. Кременчук (рис. 2.9);
4. Петлева схема живлення, к.з. на ст. Кременчук 262пк7 (рис. 2.10).

На тяговій підстанції за допомогою ІДК «Регіна» зареєстровано такі параметри: струм короткого замикання, напруга на шинах при короткому замиканні, відстань до місця короткого замикання. Отримані дані відображено у таблиці.

Таблиця 2.2 Результати експериментів з короткого замикання за даними ІДК «Регіна»

Номер дослідів	Струм короткого замикання $I_{\text{К}}$, А	Напруга при короткому замиканні $U_{\text{К}}$, кВ	Віддаленість до ї короткого замикання l , км
1	1 226	23,062	45,5
2	2 200	21,358	30,25
3	846	24,497	60,22
4	1 200	23,155	44,9



Рис. 2.7. Схема ділянки для 1-го дослідження КЗ

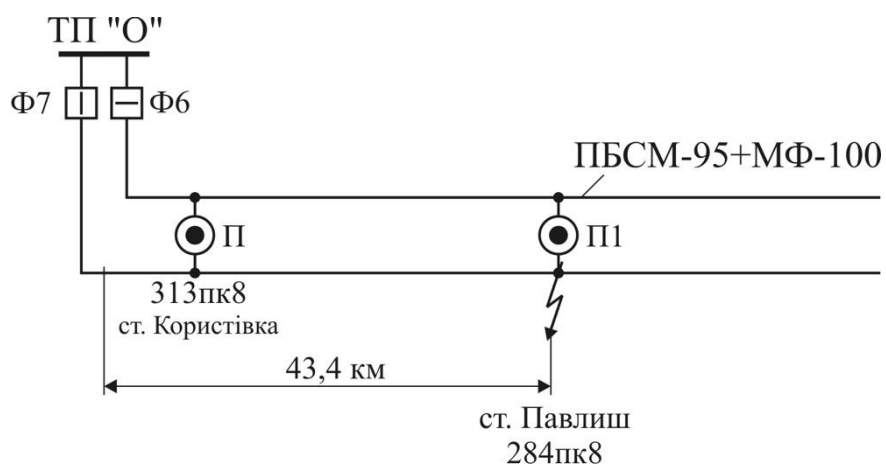


Рис. 2.8. Схема ділянки для 2-го дослідження КЗ

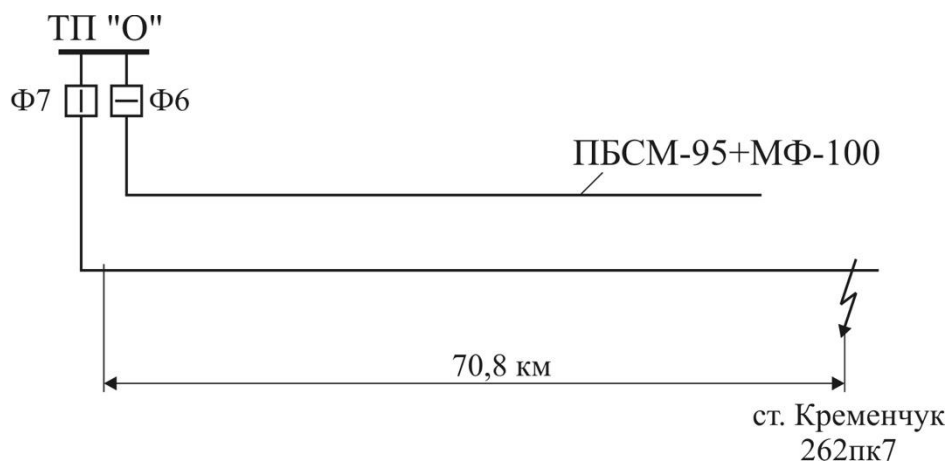


Рис. 2.9. . Схема ділянки для 3-го дослідження КЗ

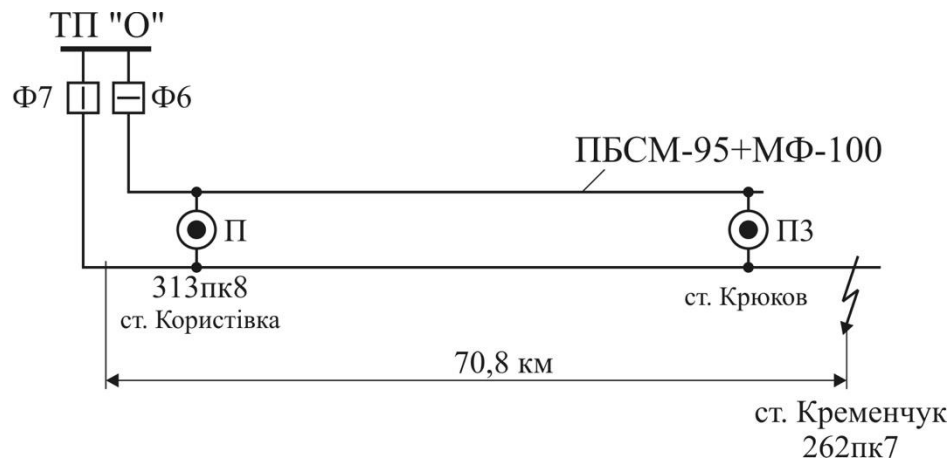


Рис. 2.10. . Схема ділянки для 4-го досліду КЗ

2.5. Аналіз завантаження пристроїв електропостачання

На тяговій підстанції змінного струму ТП Олександрія встановлено два головних трансформатори з знижувальним ступенем потужністю 40 000 кВА, що працюють паралельно або окремо.

Працівники обслуговуючого персоналу повідомляють, що в певні періоди, навіть за умов нормального електропостачання, тяговий трансформатор не справляється з навантаженням.

Розглянемо навантаження трансформатора ТП Олександрія, ураховуючи районне навантаження (обмотка 35 кВ). Згідно з вимірюваннями, споживання обмотки 35 кВ становить приблизно 7500 кВА (рис. 2.11).

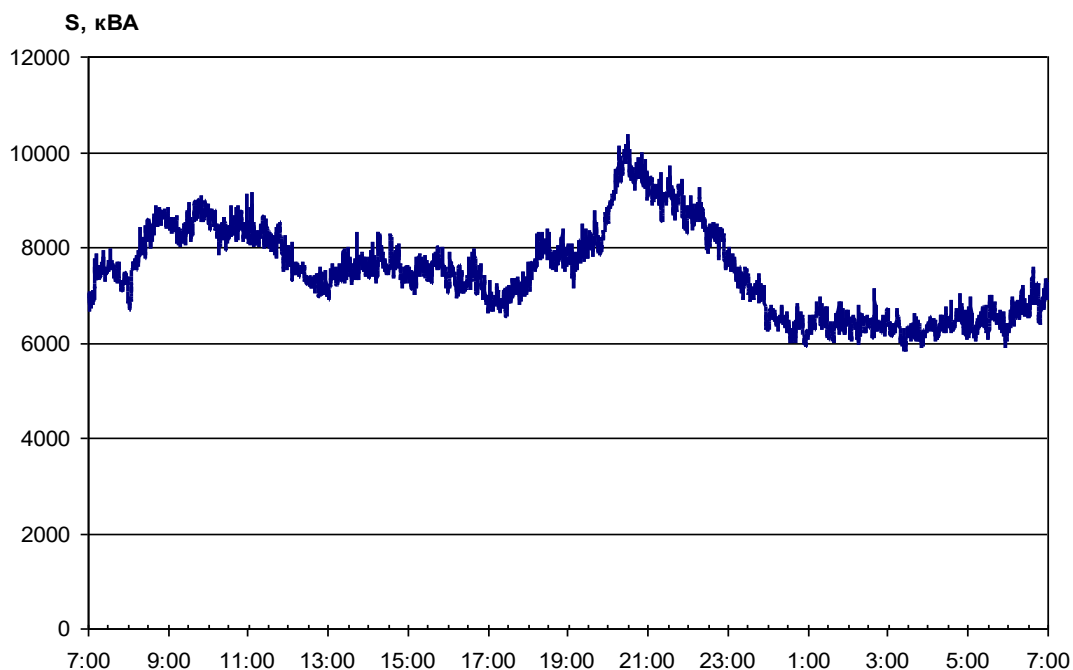


Рис. 2.11. Профіль районного навантаження потужності на 35 кВ ТП «О»

Сумуючи потужності районного і тягового навантажень, отримуємо сумарний профіль навантаження трансформатора (рис. 2.12) і, приводячи його до номінальної потужності 40 000 кВА, отримуємо коефіцієнт навантаження трансформатора (рис. 2.13).

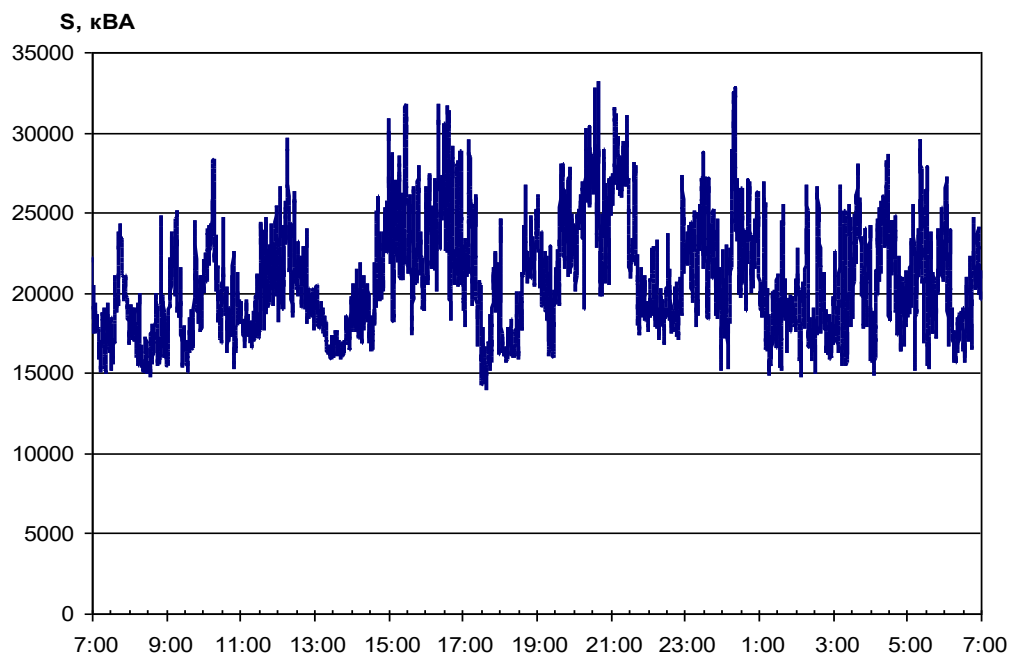


Рис. 2.12. Загальний профіль потужності тягового трансформатора ТП «О»

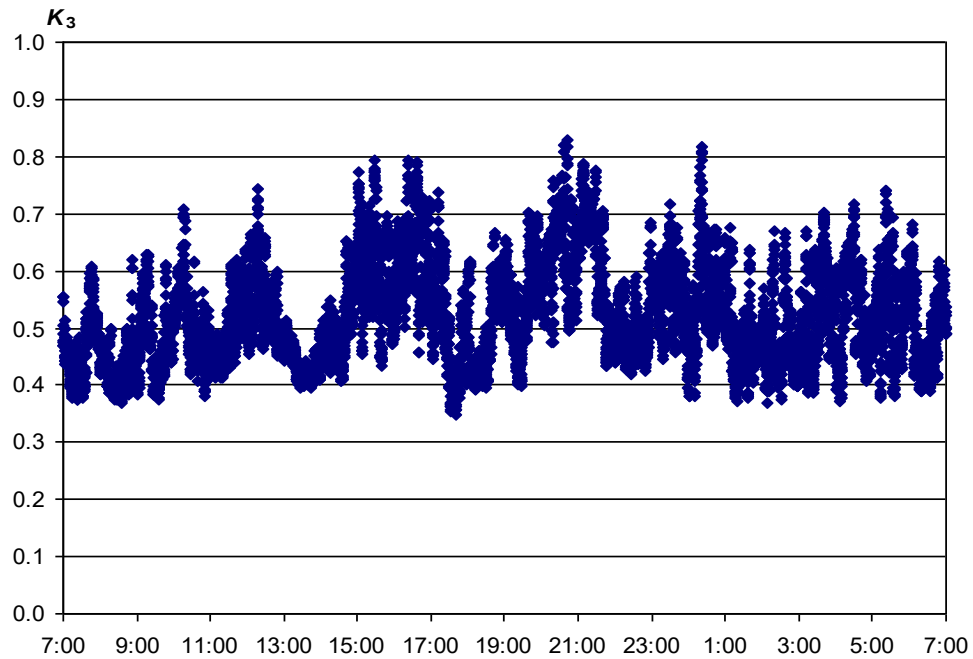
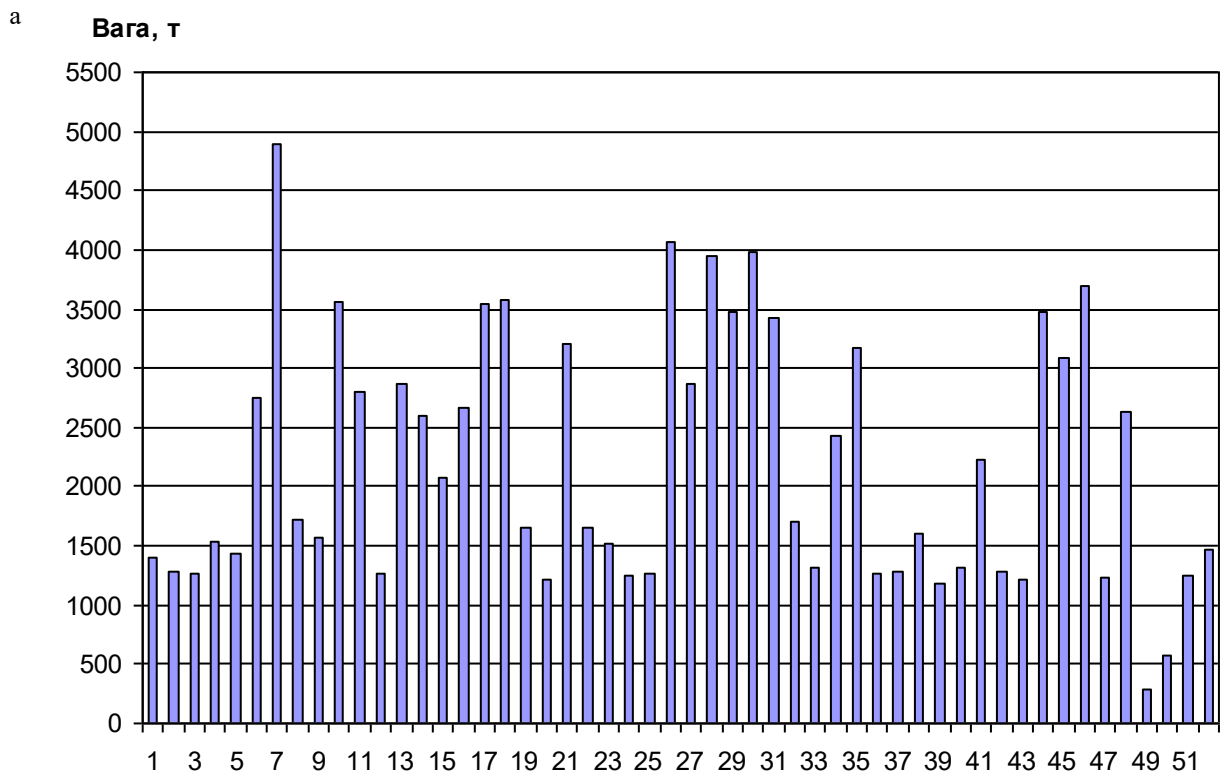


Рис. 2.13. Коефіцієнт навантаження тягового трансформатора ТП «О»

Згідно з рис. 2.13, під час дослідних вимірювань, коефіцієнт навантаження трансформатора не перевищує 0,85. Під час проведення досліджень по трасі Знам'янка – П'ятихатки було проведено 52 парні і 54 непарні електричні поїзди. Розподіл ваги непарних і парних поїздів наведено на рис. 2.14.



6

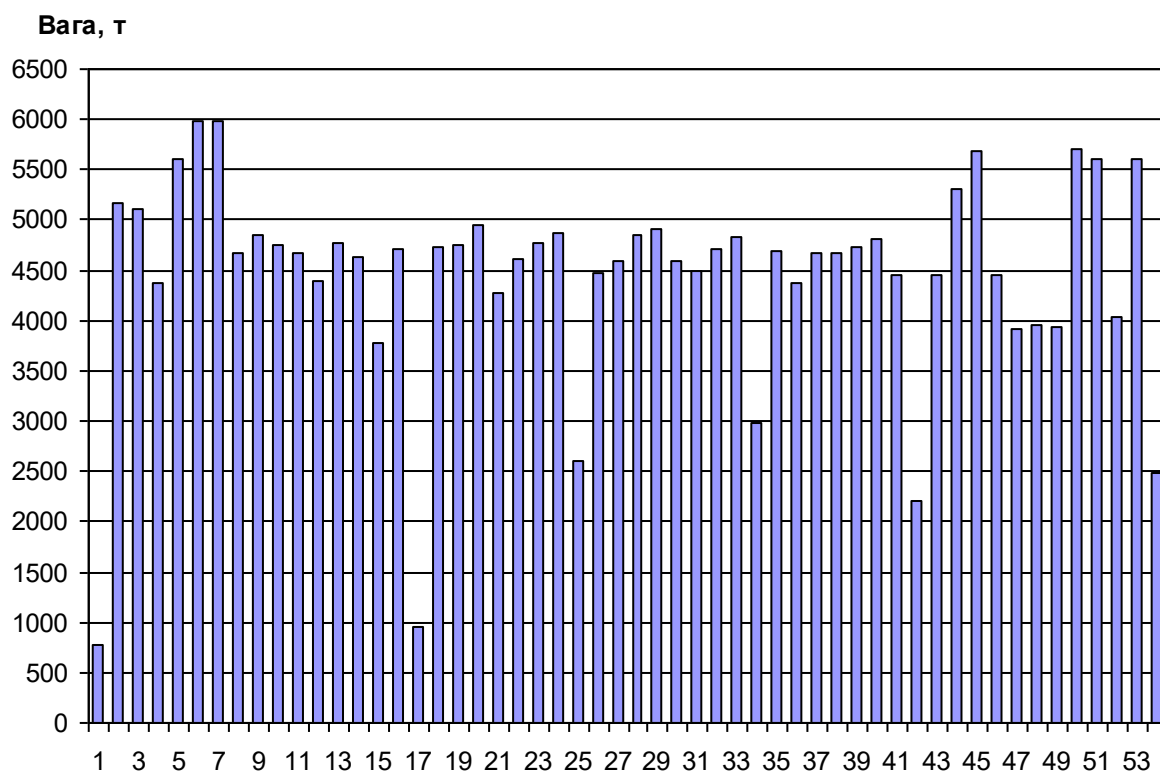


Рисунок 2.14. Вагове розподілення поїздів в парному (а) та непарному (б) напрямку

На рисунку 2.15 показано профіль прогнозованої повної потужності тягового трансформатора при русі електризованими потягами по ділянці Коростівка - Кременчук.

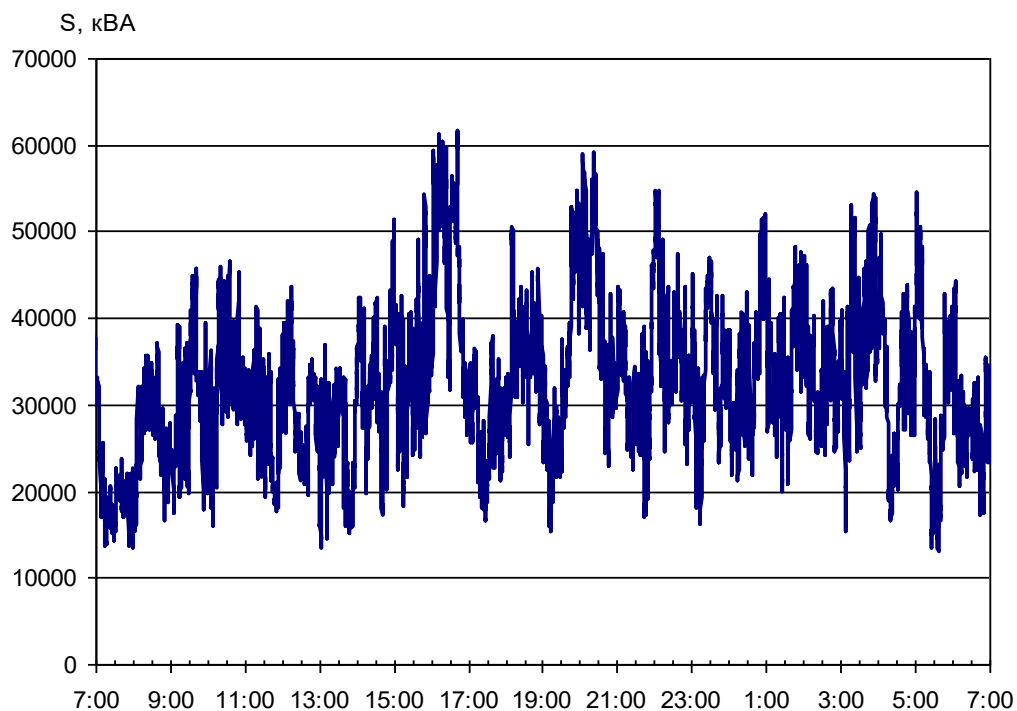


Рис. 2.15. Прогноз навантаження повної потужності тягового трансформатора на ТП «О»

З прогнозу стає очевидним, що один тяговий трансформатор з номінальною потужністю 40000 кВА для руху поїздів по новій ділянці, ймовірно, буде недостатній.

З метою зниження навантаження на тяговий трансформатор, в проекті розглядається можливість встановлення регульованої системи компенсації реактивної потужності. Попередні обрахунки вказують на зменшення прогнозованого навантаження при використанні компенсаційного обладнання нижче 40 000 кВА з умовою повної компенсації в лівому та правому плечах живлення тягової підстанції.

Більш точне визначення навантаження на тяговий трансформатор може бути проведено після впровадження системи компенсації реактивної потужності в автоматичному режимі та складення розкладу руху поїздів на новій ділянці.

Впровадження в експлуатацію тягової підстанції в Кременчуці і обладнання для автоматичної компенсації реактивної потужності на підстанції «О» є важливими для забезпечення пропускної спроможності через паралельну роботу тягових трансформаторів.

3. ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ДІЛЯНКИ ЗНАМ'ЯНКА–ДОЛИНСЬКА

3.1. Вимірювання параметрів електроспоживання на тягових підстанціях

Проводили паралельні вимірювання параметрів споживачів на трьох підстанціях Одеської залізниці: Знам'янка (З), Шаровка (Ш), Тимкове (Т).

Мета вимірювань - визначення пропускної здатності даної ділянки при зростанні вантажопотоку, аналіз навантаження тягових трансформаторів і прогноз його змін при будівництві та електрифікації другої колії.

Використаний для вимірювань переносний аналізатор якості електричної енергії виробництва SATEC (Ізраїль), оснащений кліщами Роговського:

1. EDL-175хг, зав. № 723789 Знам'янської дистанції електропостачання;
2. EDL-175хг, зав. № 725151 Долинської дистанції електропостачання;
3. EDL-175хг, зав. № 723096 ДНУЗТ.

Підключення приборів виконувалося у колах комерційного обліку, трансформаторах струму та напруги 27,5 кВ тягових трансформаторі, які були в роботі. Вимірювання проводили протягом 1 доби з інтервалом реєстрації параметрів в 1 секунду.

При проведенні вимірювань пристрої компенсації реактивної потужності працювали в режимі нормально встановленій схемі: на ТП Знам'янка – КУ було включено в фазу «b» (рис. 3.1).

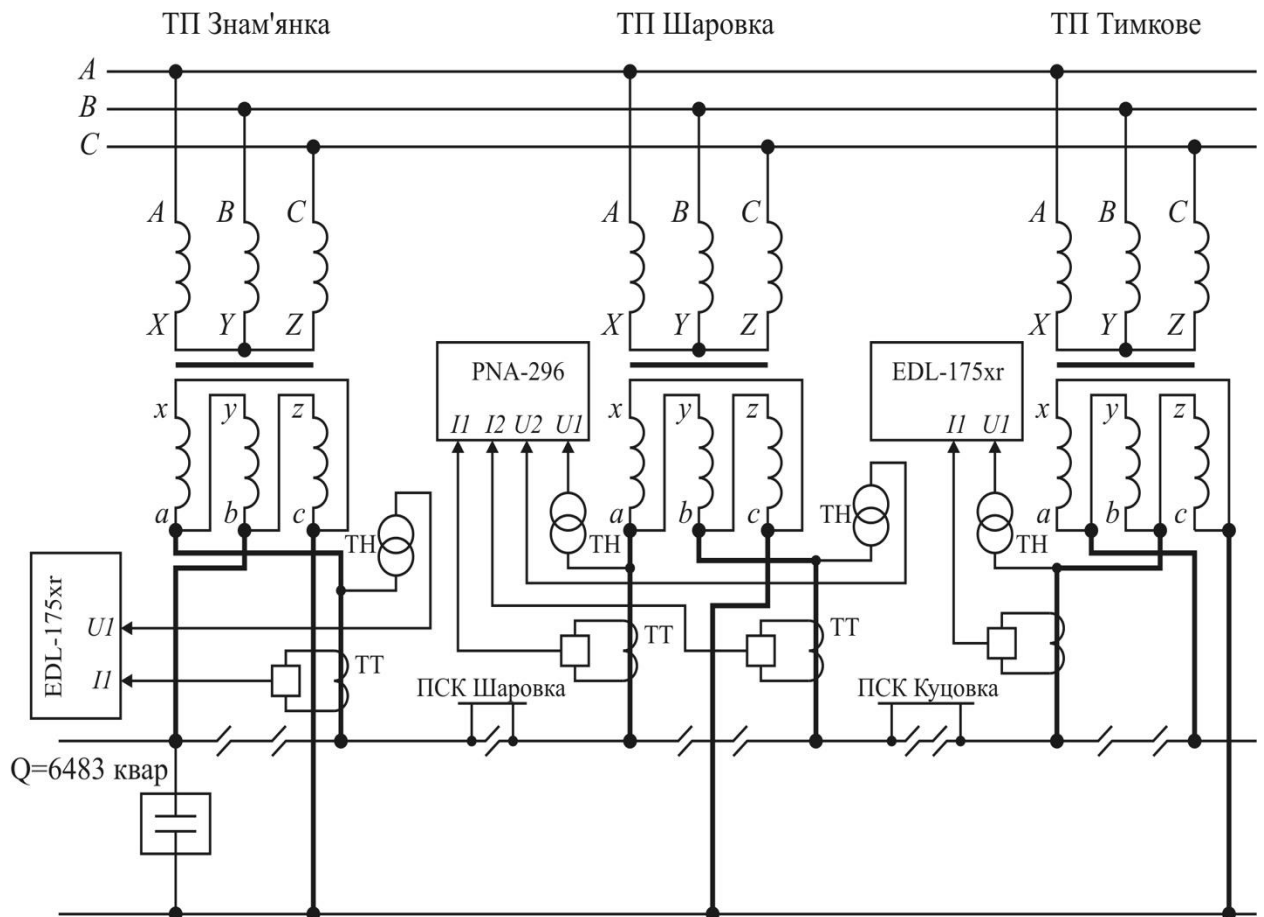


Рис. 3.1. Схема проведення вимірювань на обраній ділянці електропостачання

По завершенні обробки даних, отриманих з використанням обраної схеми підключення та видів вимірювальної техніки, є наступні результати.

ТП Знам'янка:

- частота напруги 27,5 кВ від 49,94 Гц до 50,05 Гц;
- рівень напруги в фазі «а» коливався від 24,435 кВ до 27,890 кВ;
- струм плеча живлення був в діапазоні 0..315 А, з середньою величиною 67 А;
- коефіцієнти спотворення синусоїди напруги знаходились у діапазоні від 1,1 до 7,7 %, середнє дорівнює 3,36 %;
- середнє значення коефіцієнтів спотворення синусоїди струму було 36,7 %, проте окремі викиди до 600-700 % практично не впливали на загальну картину;
- коливалось значення активної потужності від -1377 кВт (генерація) до 6272 кВт (споживання);

- значення реактивної потужності мінялося від -758 квар (генерація) до 3418 квар (споживання);
- розподіл вищих гармонік складової напруги: 5 (3,78 %), 7 (3,25 %), 3 (3,12 %), 9 (1,02 %), 21 (0,62 %), 11 (0,38 %);
- розподіл вищих гармонік складової струму: 3 (25,7 %), 5 (12,3 %), 7 (5,65 %), 9 (2,95 %), 11 (1,54 %), 13 (0,8 %), 15 (0,8 %), 17 (0,6 %);

ТП Шаровка:

- частота напруги 27,5 кВ від 49,93 Гц до 50,04 Гц;
- коливалися значення напруги в фазах «а» та «b» в межах від 25,384 кВ до 27,396 кВ та від 24,235 кВ до 27,875 кВ відповідно;
- струми живлення були в діапазоні 0..151 А (фаза «а») та 0..149 А (фаза «b»), із середніми значеннями 31 А та 32 А відповідно;
- коефіцієнти спотворення синусоїди напруг кожної фази знаходились у діапазоні від 0,8 до 8,6 % та від 0,7 до 10,7 %, с середніми величинами 2,79 % та 2,51 % відповідно;
- середньо коефіцієнти спотворення синусоїди струму визначалися як 18 % та 8 %, проте існували окремі викиди до 70 %, які не впливали значно на загальні результати;
- значення активної потужності мінялися від 0 до 14500 кВт в цілому по фазам «а» та «b»;
- значення реактивної потужності змінювалися від 0 до 8500 квар в цілому по фазам «а» та «b»;
- розподіл вищих гармонік складової напруги: 5 (4,4 %), 3 (3,7 %), 7 (3,0 %), 9 (2,1 %), 13 (1,3 %), 15 (0,9 %);
- розподіл вищих гармонік складової струму: 3 (20,3 %), 5 (11,2 %), 7 (6,5 %), 9 (3,8 %), 11 (2,1 %), 13 (1,4 %).

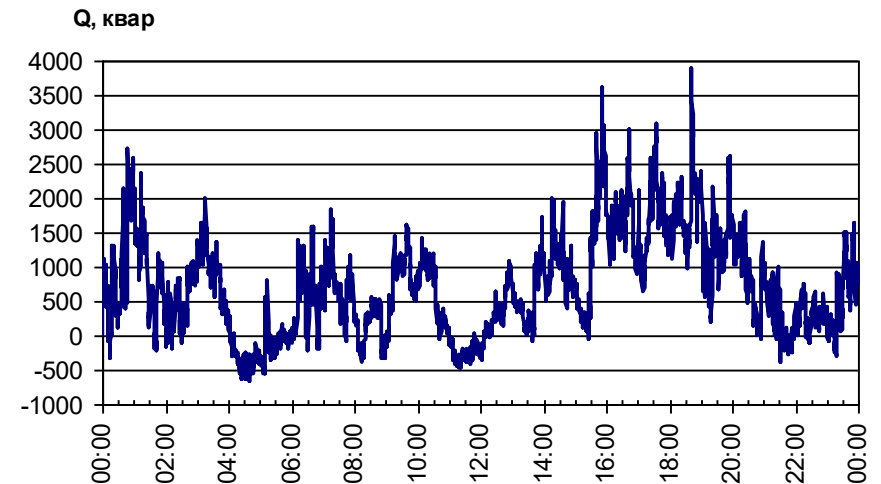
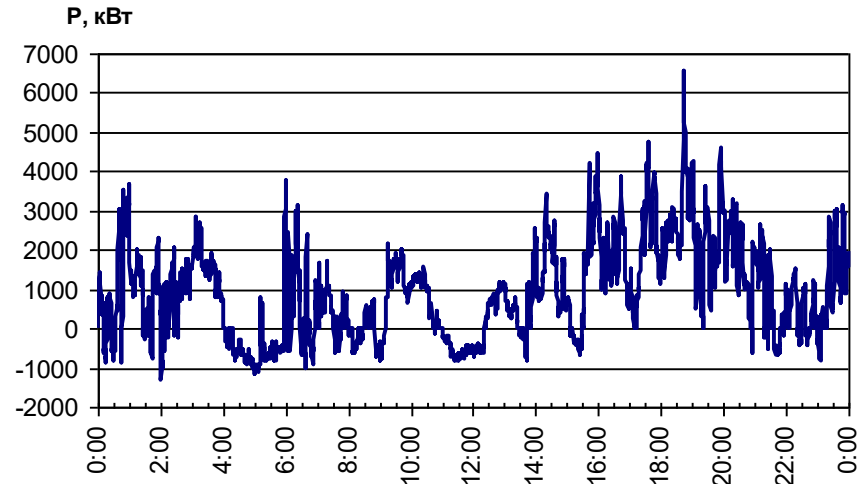
ТП Тимкове:

- значення частоти напруги 27,5 кВ змінювалось у межах від 49,95 Гц до 50,03 Гц;
- амплітуда напруги на шинах підстанції варіювалася в діапазоні від 26,216 кВ до 28,321 кВ;
- ширина коридору струмів плеча живлення від 0 до 304 А, середнім значенням є 23 А;
- коефіцієнти викривлення форми синусоїди напруги відхилялись у межах 0,6..5,9 %, з середнім значенням у 1,78 %;
- значення коефіцієнтів спотворення синусоїдальності кривої струму в середньому дорівнюють 4,6 %, з інтервалами часу з подальшими викидами до 35 %;
- активна потужність по фазі «b» демонструвала показники від 0 до 6329 кВт;
- показники реактивної потужності по фазі «b» варіювалися в межах від 0 до 5339 квар;
- набір вищих гармонік для напруги включає 3 (3,2 %), 5 (2,7 %), 7 (2,3 %), 17 (1,4 %), 13 (1,1 %), 11 (1,0 %); набір вищих гармонік для струму включає 3 (17,6 %), 5 (8,0 %), 7 (4,0 %), 9 (2,2 %), 11 (1,4 %), 13 (1,1 %).

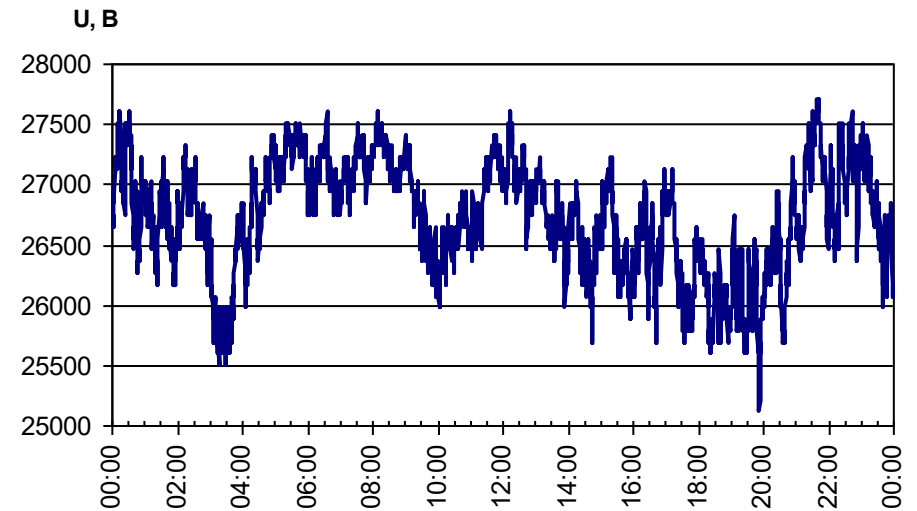
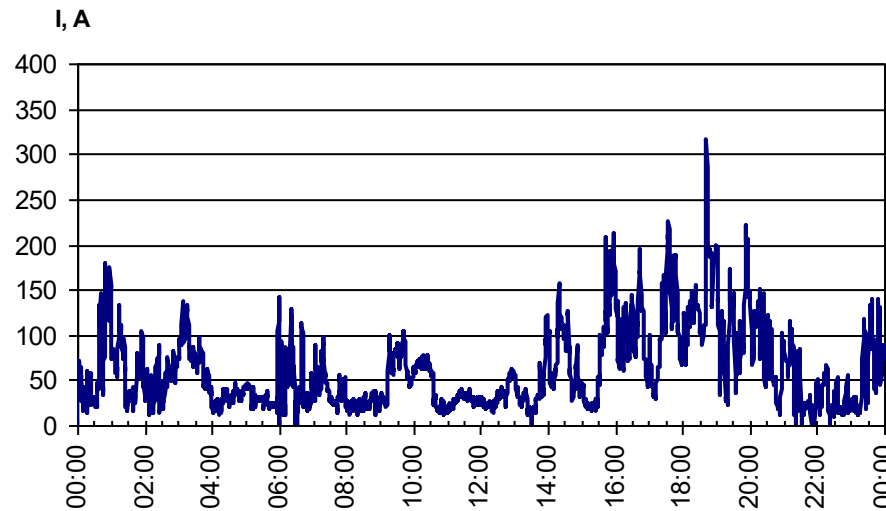
Знам'янське ТП

Фаза «а», без застосування компенсації

Добовий графік споживання активної та реактивної потужностей



Добовий графік значень струму навантаження та напруги



3.2. Аналіз завантаження пристроїв електропостачання

На дослідних тягових ТП (ТП Шаровка, ТП Тимкове) для живлення тягової мережі налаштовано два основних знижувальні трансформатори з потужністю 40 000 кВА. Додатковий тяговий трансформатор для живлення випрямних агрегатів постійного струму із номінальною потужністю 40 000 кВА встановлений на ТП Тимкове.

Розглянемо поточне навантаження зазначених тягових трансформаторів та прогнозне, що за планом відповідатиме збільшенню потягів до 60 пар за добу. Прогнозоване навантаження розраховується на базі збільшення профілю потужності тягових підстанцій відповідно до збільшення обсягів руху потягів.

Профілі повних потужностей тягових трансформаторів ТП Шаровка та ТП Тимкове представлено на рис. 3.2, 3.3.

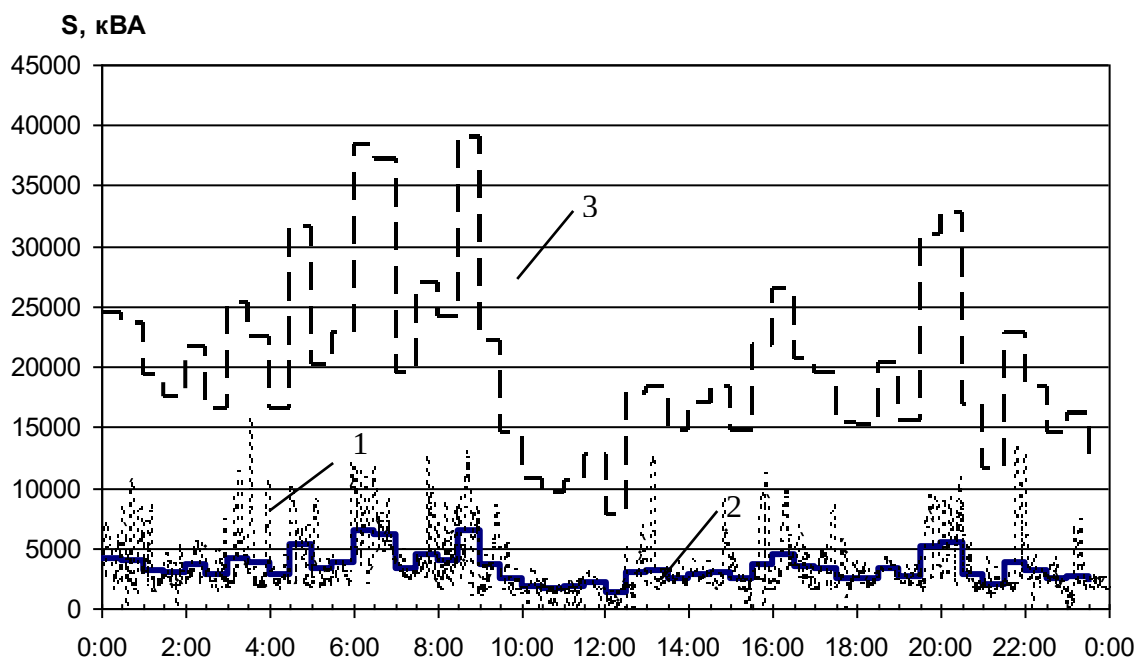


Рис. 3.2. Профіль повної потужності тягового трансформатора ТП Шаровка:

1 – вимірювання; 2 – АСКОЕ; 3 – прогноз

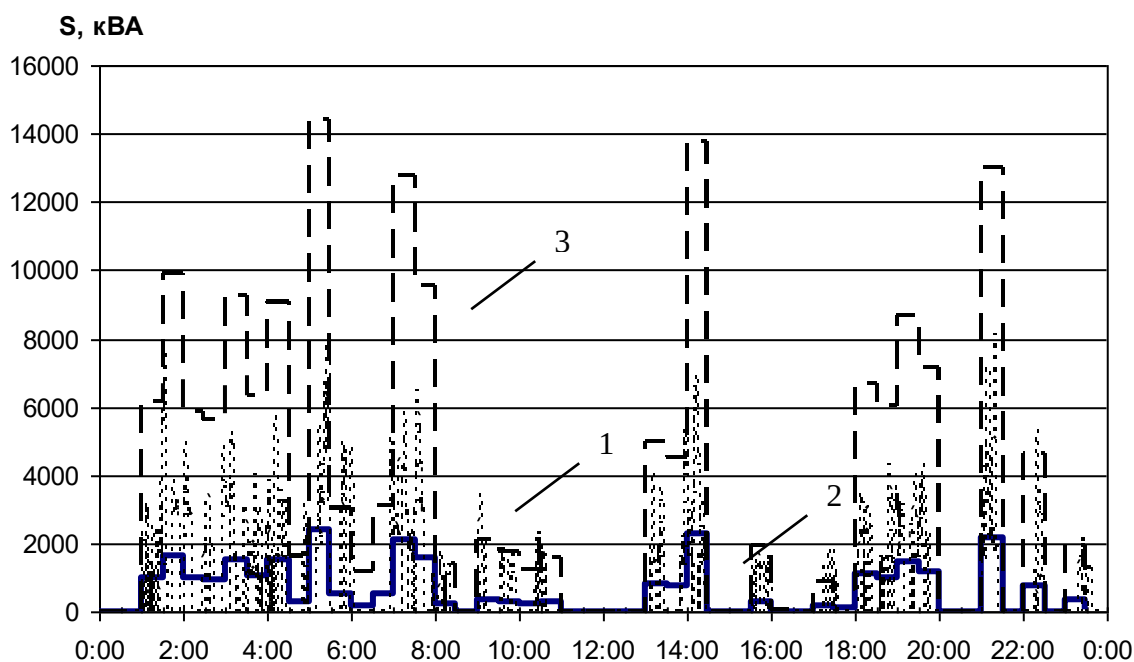


Рис. 3.3. Профіль повної потужності тягового трансформатора ТП Тимкове:

1 – вимірювання; 2 – АСКОЕ; 3 – прогноз

Переводячи отримані дані до номінальної потужності тягових трансформаторів, ми визначаємо відповідні коефіцієнти завантаження (рис. 3.4, 3.5).

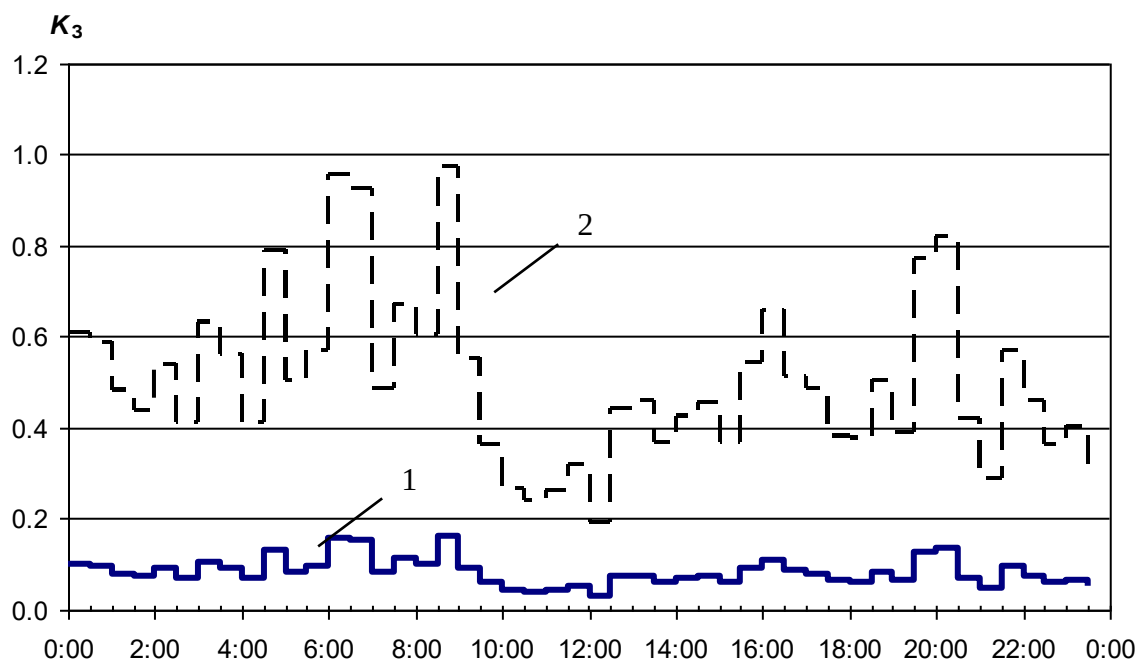


Рис. 3.4. Коефіцієнти завантаження тягового трансформатора підстанції Ш:

1 – існуючий; 2 – прогнозований

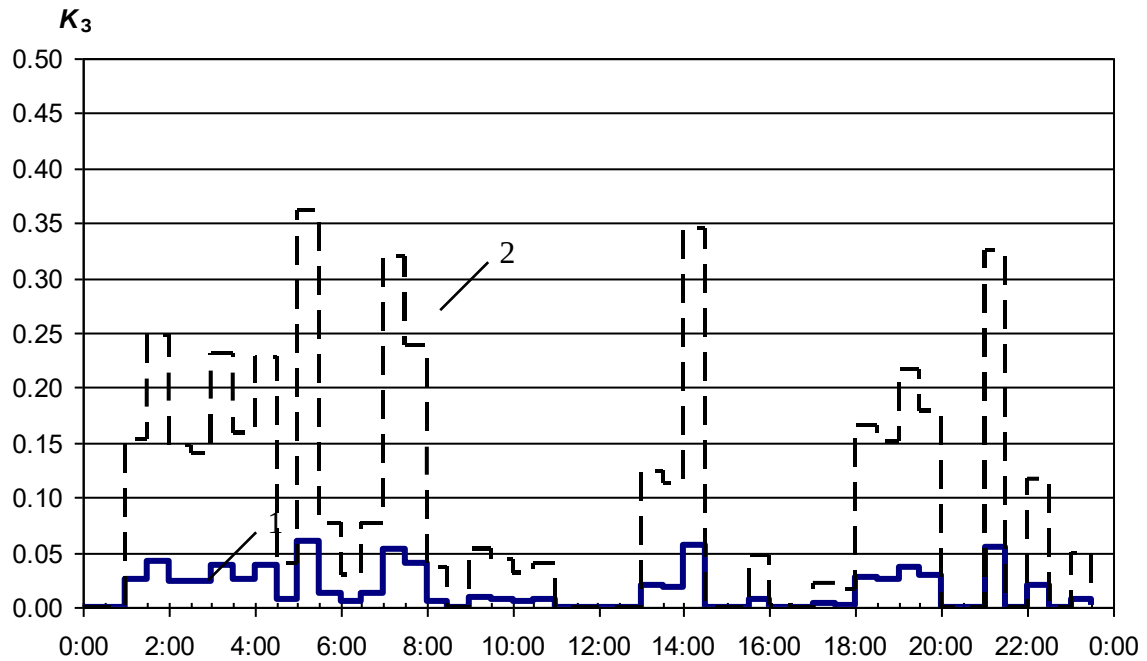


Рис. 3.5. Коефіцієнти завантаження тягового трансформатора підстанції Т:
1 – існуючий; 2 – прогнозований

За результатами дослідних тягових підстанцій, в обох випадках прогнозований коефіцієнт завантаження трансформаторів не перевищує номінальний (1,0).

На основі отриманих даних, приходимо до висновку, що після запуску другої колії, пропускна спроможність буде повністю забезпечена. Необхідності додаткових заходів для забезпечення руху 60 пар поїздів в добовому циклі з нормальною схемою живлення пристроїв електропостачання немає.

4. ОЦІНКА ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НА ДОСЛІДНИХ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЯХ

4.1. Загальне оцінювання характеристик якості

Технічні можливості дистанцій електропостачання Одеської залізниці дозволяють виконувати вимірювання характеристик якості електричного струму на тягових підстанціях змінного струму.

Згідно з нормативним документом [11], краще проводити вимірювання протягом 1 доби з відповідними періодами усереднення для кожного показника (мінімально – 3 секунди). Аналізатори якості електричного струму EDL-175 та PNA-296, виготовлені компанією Satcs, забезпечують дотримання цих вимог.

Комплексні вимірювання були проведені на тягових підстанціях Знам'янка, Олександрія, П'ятихатки, Тимкове, Шаровка з допомогою зазначених мобільних аналізаторів електроенергії. Прилади розміщувалися у вторинні кола вимірювальних трансформаторів струму і напруги на приєднаннях 154 кВ, 35 кВ та 27,5 кВ у відповідність із часом. Загальна картина показників якості електроенергії типова для кожної тягової підстанції змінного струму. Графіки показників якості електроенергії подано за прикладами тягових підстанцій Знам'янка (З) і Олександрія (О).

Недостатня якість електричного струму в основному спричинена перевищенням встановлених гранично допустимих значень коефіцієнта спотворення форми синусоїди напруги на приєднаннях 35 кВ, 27,5 кВ.

Переважно, коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю у первинній мережі підстанцій (154 кВ) не перевищує встановленого максимуму (4,0 %), в середньому становлячи від 0,84 до 2,08 %. Однак на приєднаннях 35 кВ майже весь час відзначаються перевищення вимог до встановлених лімітів вдвічі (2,0 %). Відзначається особливо значне перевищення цієї характеристики на підстанціях, де проходить стик систем тяги постійного та змінного струму (підстанція П'ятихатки), тому що тільки одна обмотка нижчої напруги трансформатора безпосередньо живить тягову мережу.

На підстанції Знам'янка в періоди відсутності тягового навантаження було виявлено виробництво електроенергії, що демонструє присутність

компенсуючих струмів через тягову мережу. В окремі моменти середньостатистичне значення активної складової цих струмів дорівнює приблизно 185 А.

В ситуації з навантаженням в тяговій мережі на підстанції Знам'янка, третя гармонійна складова спектру активної потужності мала протилежний напрям до основної складової, але на підстанції Олександрія, сусідній до неї, гармонійні складові спектру активної потужності були спрямовані в однаковий бік. Кількість енергії, виданої третьою гармонікою в мережу протягом доби, сягає 650 кВт·год, що є 0,66 % від добового споживання енергії основною гармонікою одного з плечей живлення.

Протягом вимірювань кути тягового навантаження плечей живлення підстанцій змінювалися від $+30$ до $+90^\circ$ (без компенсації), а з компенсацією їх варіативність збільшувалася від -90 до $+90^\circ$. Підсумково, середні кутові значення навантажень на плечах однієї з тягових підстанцій за добу склали $28,6^\circ$ і $66,9^\circ$, що відповідають тангенсам 0,54 і 2,35 відповідно. Негативні значення кутів навантаження в плечах живлення вказують на перекомпенсацію реактивної потужності, але при одночасному наявному навантаженні в суміжному плечі це не призводить до перекомпенсації на весь об'єм підстанції – середньодобовий коефіцієнт реактивної потужності при приєднанні 27,5 кВ становить 1,30.

Після завершення вимірювання, отримані дані були усереднені до часових інтервалів, встановлених нормативним документом [2].

Нижче представлено оброблені результати вимірювань.

Як показано на рисунку 4.1 рівень напруги в первинній мережі деяких тягових підстанцій має відмінності, що зумовлено втратами напруги та режимами роботи зовнішньої системи електропостачання.

За допомогою переключення анцапф первинної обмотки тягового трансформатора, напруга на районній обмотці 35 кВ у двох тягових підстанцій стає приблизно ідентичною. Проте, напруга на тяговій обмотці 27,5 кВ підстанції О вища за напругу на шинах підстанції З, що є безперечною причиною появи

зрівняльних струмів у тяговій мережі та зменшення енергоефективності системи тягового електропостачання (рис.4.2).

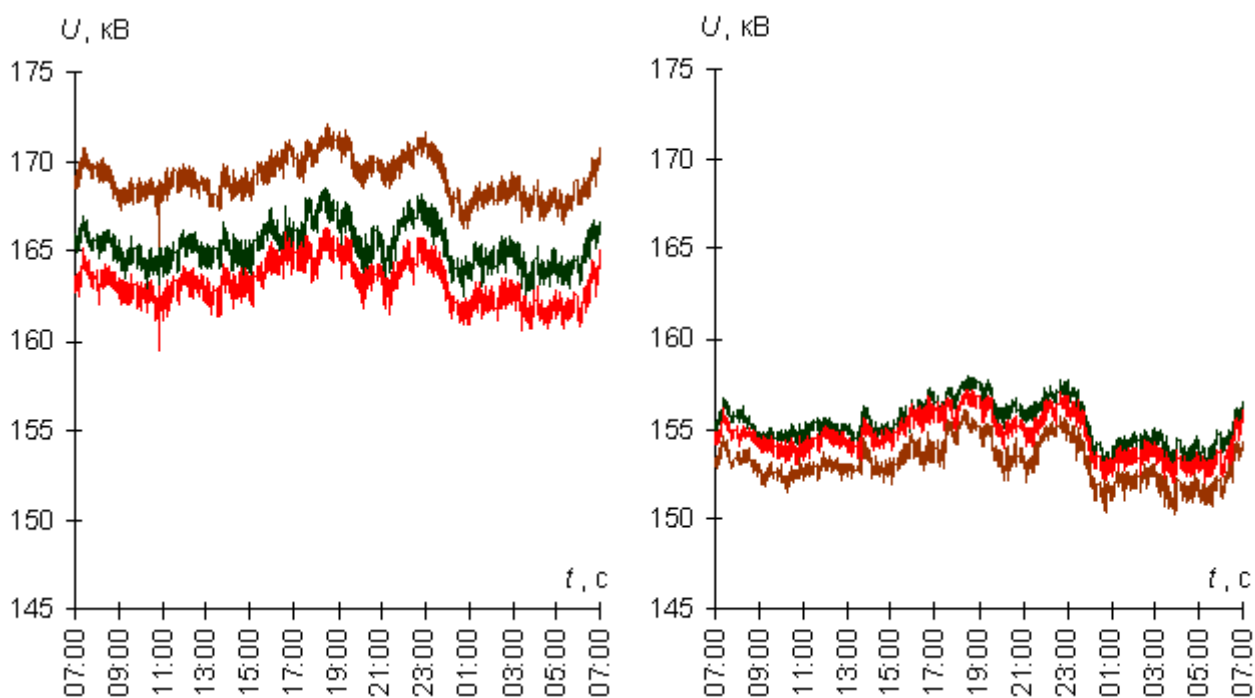


Рис. 4.1. Рівень напруги у первинній мережі (154 кВ) тягових підстанцій З і О

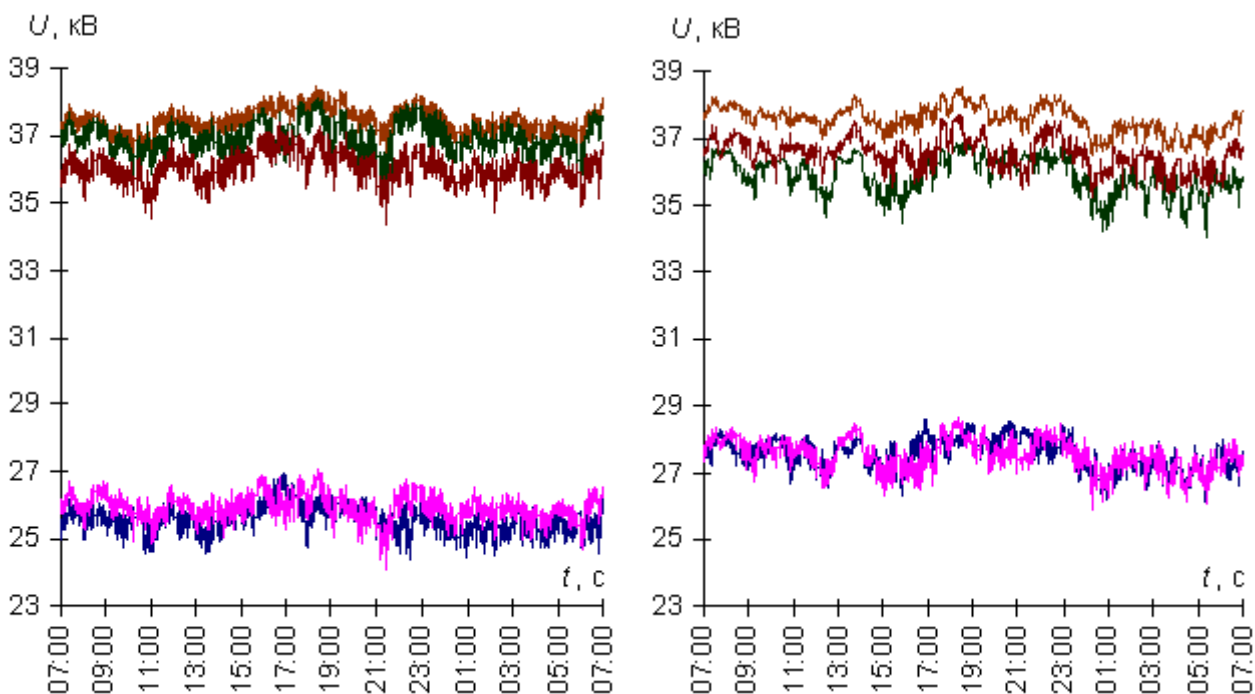


Рис. 4.2. Рівень напруги на виводах 35, 27,5 кВ тягових підстанцій З і О

На рис. 4.3 – 4.5 представлені коефіцієнти спотворення синусоїдальності напруги відносно кожної фази і кожного виходу на підстанціях З і О. Значимим є майже однакове спотворення синусоїдальності напруги в кожній фазі. Якість електричної енергії за цим показником відповідає стандарту [2] лише в магістральній мережі тягової підстанції О, на інших виходах - максимальні значення K_U перевищують межі допустимих значень, а значення K_U , що відповідають ймовірності 95 % за розглянутий період часу, перевищують нормативні допустимі значення.

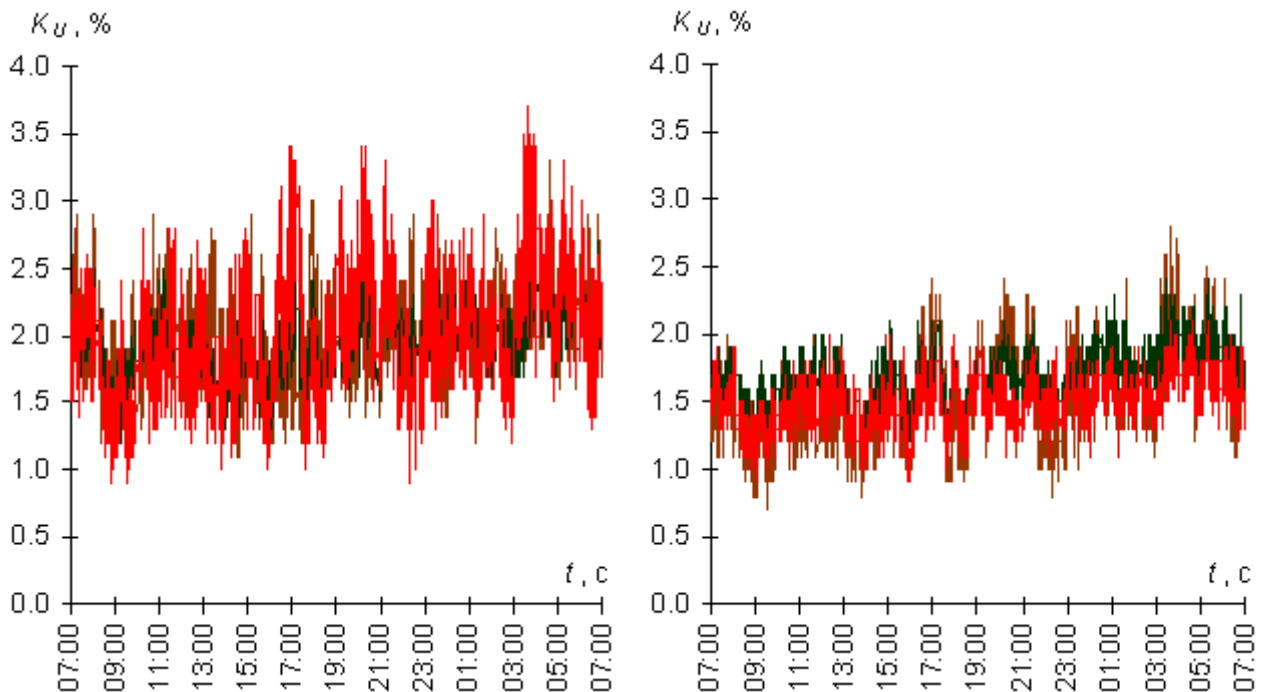


Рис. 4.3. Коефіцієнт спотворення синусоїдності напруги
у первинній мережі (154 кВ) тягових підстанцій З і О

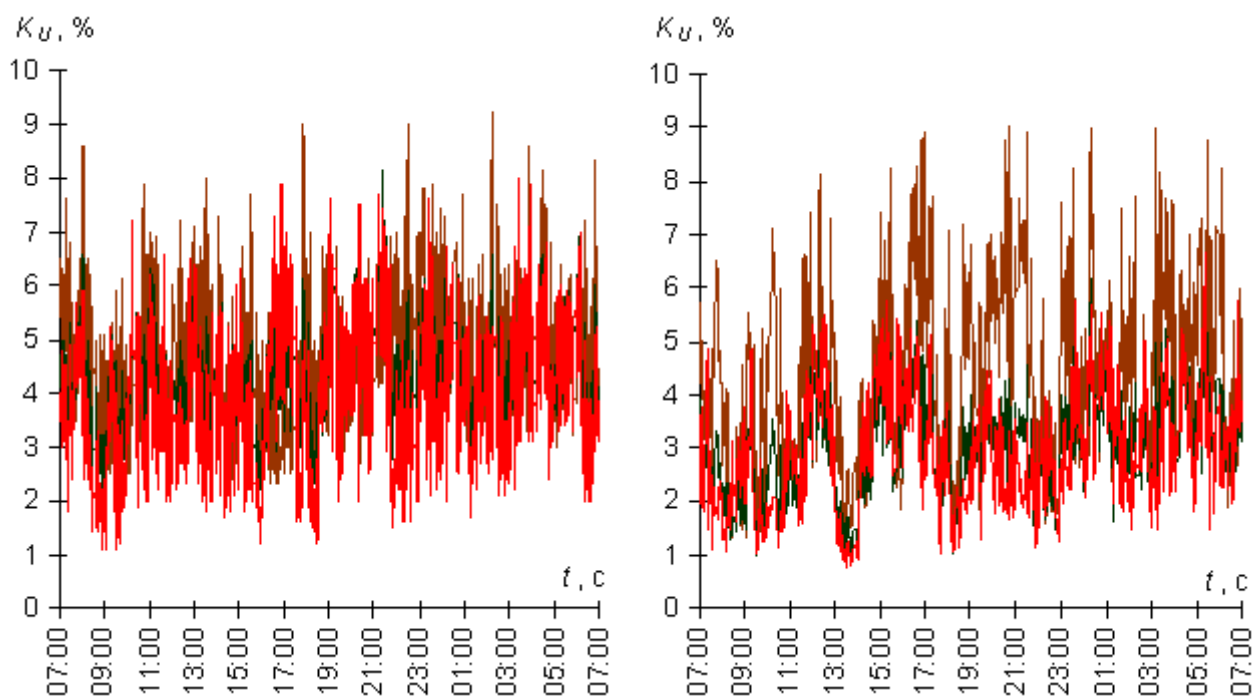


Рис. 4.4. Коефіцієнт спотворення синусоїдності напруги
на виводі 35 кВ тягових підстанцій З і О

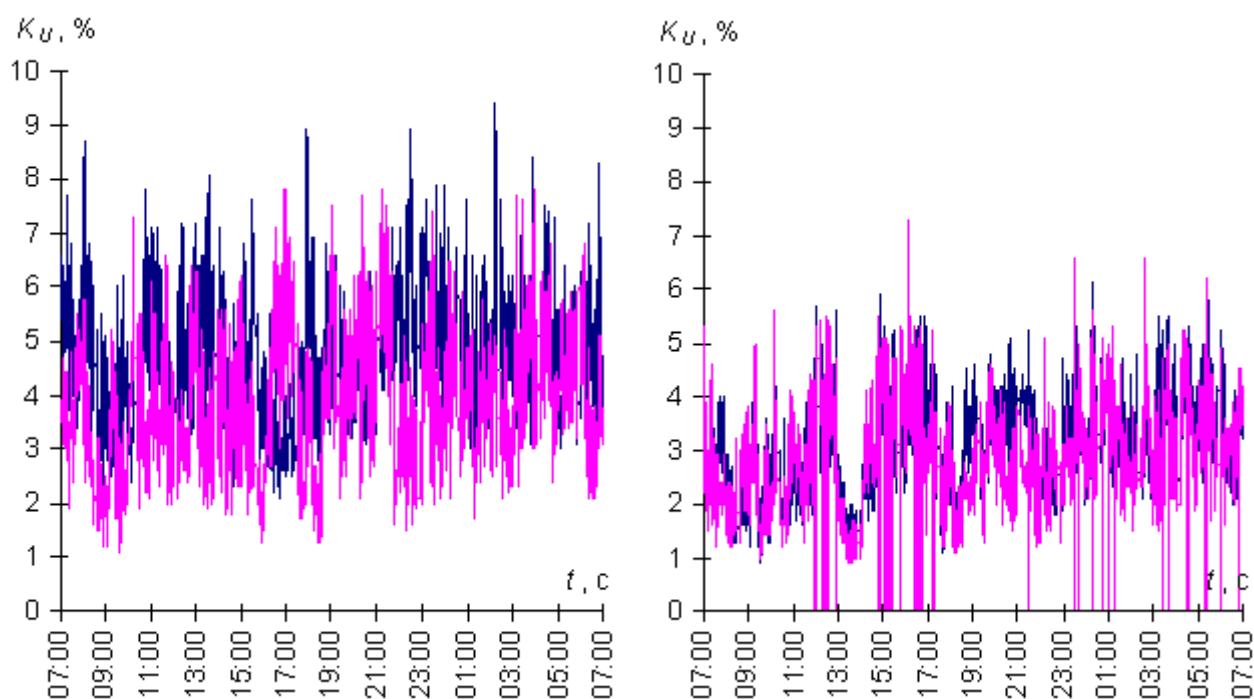


Рис. 4.5. Коефіцієнт спотворення синусоїдності напруги 27,5 кВ тягових підстанцій З і О

Результати відслідковування за показником несиметрії напруги по зворотній послідовності на виводах 154, 35 кВ представлені на рис. 4.6, 4.7. Якість електричної енергії за показником K_{2U} виконується лише в первинній мережі

підстанції О (154 кВ), на інших виводах – загальна тривалість перевищення часу нормального допустимого значення більше 5 % розглянутого періоду часу.

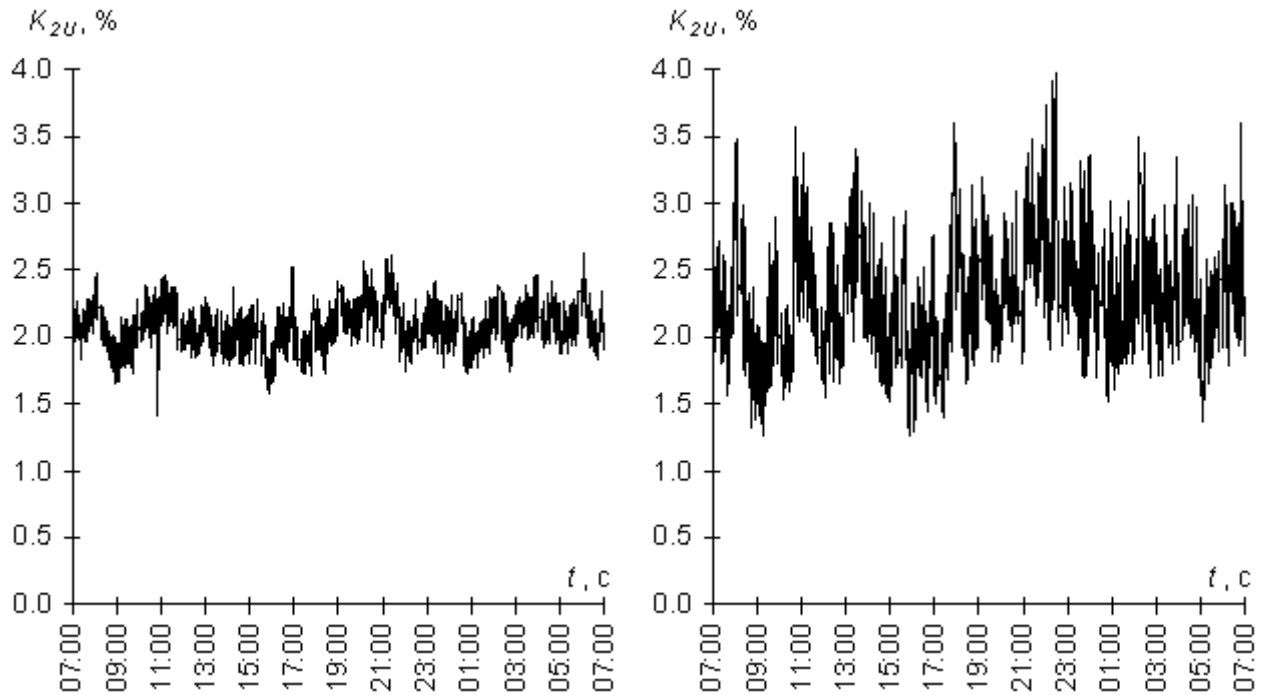


Рис. 4.6. Коефіцієнти несиметрії напруги 154 кВ та 35 кВ тягової підстанції З

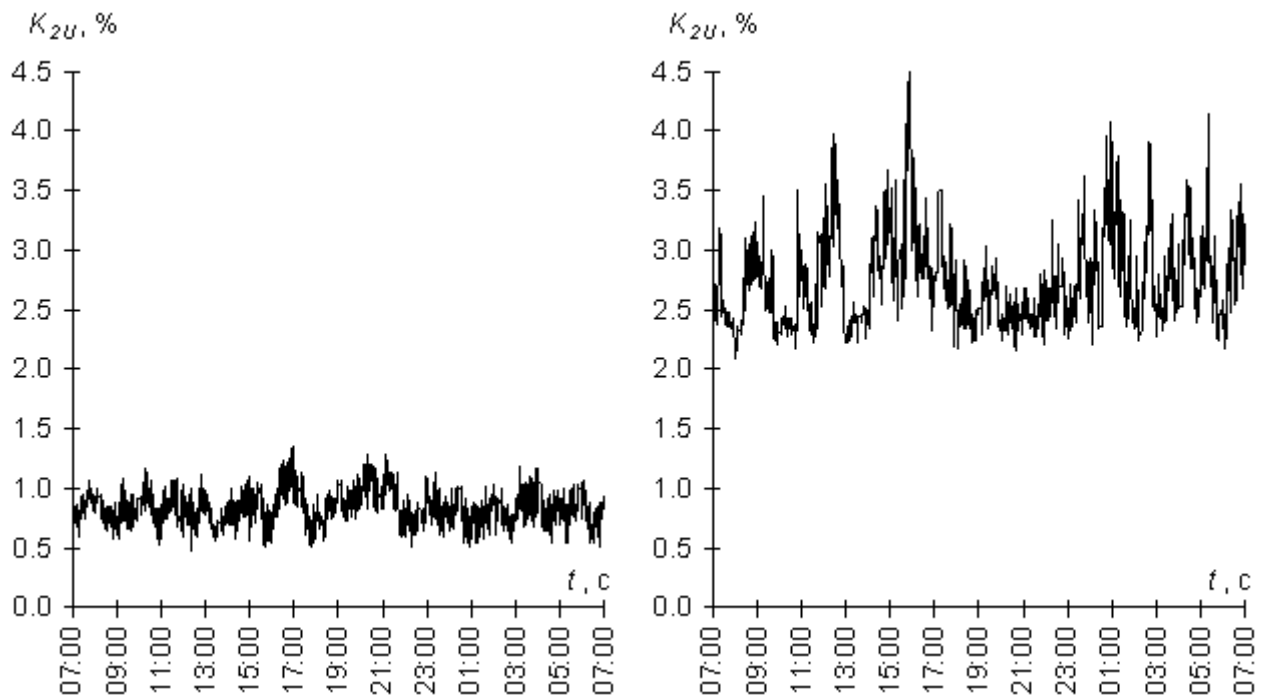


Рис. 4.7. Коефіцієнти несиметрії напруг у 154 кВ та 35 кВ на тяговій підстанції О

Поле співвідношень кінців векторів струму в первинній мережі 154 кВ тягових підстанцій є досить виразним (рис. 4.8). У відповідності до схеми підключення, на підстанції З фаза U_B використовується найменше, фази U_A та U_C

- випереджає та відстає відповідно. Щодо підстанції О: U_C - найменш завантажена, а U_A та U_B - відстають та випереджають в зазначеному порядку.

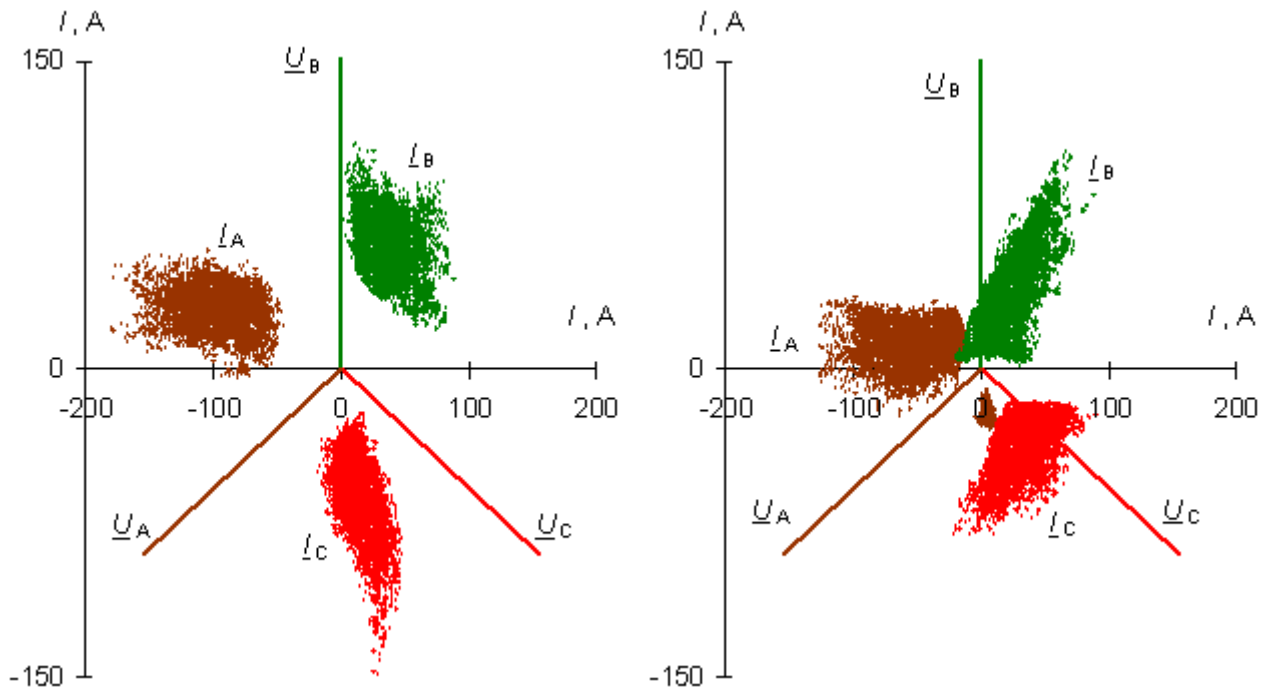


Рис. 4.8. Поля відношень між кінцями векторів струму в первинній мережі 154 кВ на тягових підстанціях 3 та О

Пристрої для компенсації реактивної потужності під'єднані до відстаючої (на підстанції 3) та випереджаючої (на підстанції О) фаз. Для підстанції 3 така конфігурація є обумовлена, насамперед, живленням від відстаючої фази відгалуженої станції, а також локомотивного та вагонного депо, де використовується значна кількість електровозів у перших режимах контролера. На підстанції О під час проектування передбачено можливість перемикання компенсаційного приладу між випереджаючою та відстаючою фазами. Нині вибрано положення «на випереджаючу» через значну величину коефіцієнта реактивної потужності ($\text{tg}\varphi$), якщо прилад встановлений «на відстаючу» фазу.

На рис. 4.9 наведені поля співвідношень кінців векторів струмів для лівого та правого плечей живлення згідно з фазою живлячої напруги- Ділянка 3 – О живиться з обох боків тими ж фазами живлячих напруг, що і праве плече (підстанція 3) та ліве плече (підстанція О).

Зрівняльні струми, які з'являються при відсутності тягового навантаження, повертають струм правої шини живлення підстанції 3 майже на 180° . Реактивна

складова тягового навантаження знижується нижче потужності компенсуючого пристрою, тоді кути струму шин живлення стають від'ємними. У результаті виникає що називається «перекомпенсація», або генерація реактивної потужності у систему зовнішнього електропостачання.

На рисунку 4.10 наведено поля відносин струмів гілок живлення тягових підстанцій 3 та О. Кореляція між струмами гілок живлення за однієї й тієї самої підстанції не спостерігається.

Поля відносин струмів, які залежать від кута навантаження лівої та правої гілок живлення для підстанцій 3 та О, представлені на рисунку 4.11. Гілка живлення тягової підстанції з пристроєм для компенсації реактивної потужності має більший розмах варіації кута навантаження: від -90° до $+90^\circ$ (ліва гілка підстанції 3) та від -30° до $+90^\circ$ (права гілка підстанції О); гілки живлення без компенсації реактивної потужності мають неоднозначні струмо-фазові

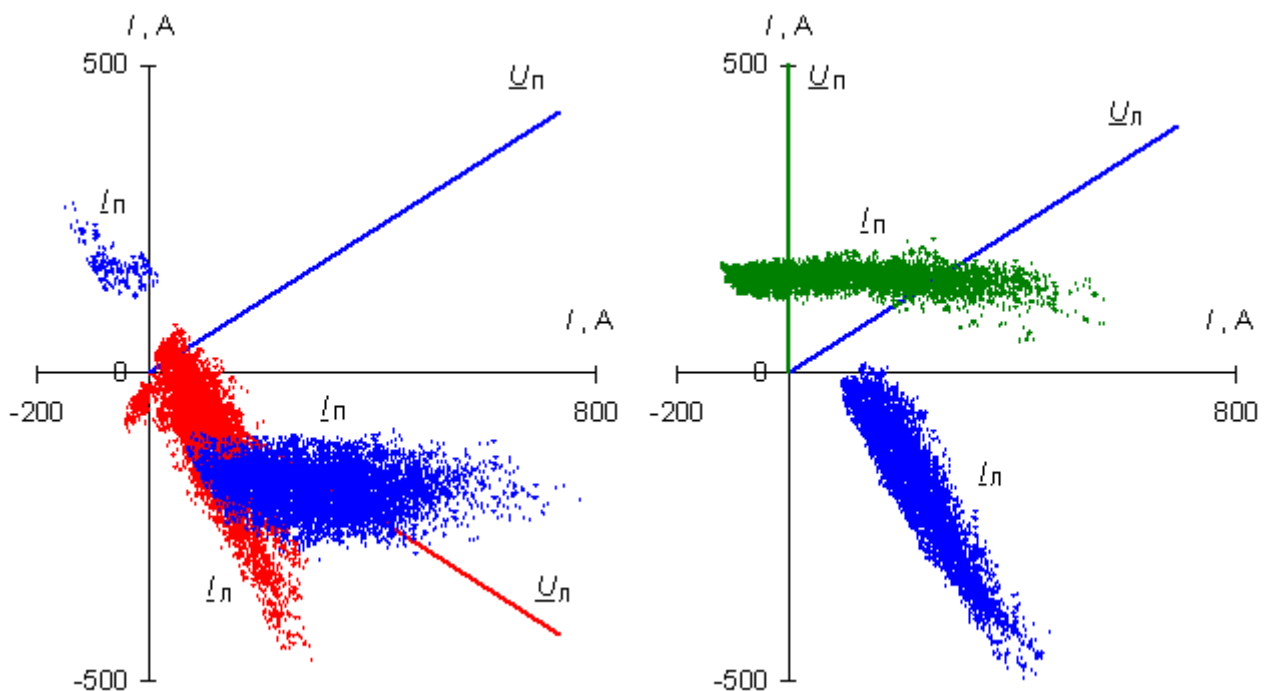


Рис. 4.9. Поля відносин країв векторів струмів
лівої та правої гілок живлення тягових підстанцій 3 та О

характеристики, отже, зі збільшенням струму лівої гілки підстанції 3, кут навантаження наближується до 90° тоді як збільшення струму правої гілки живлення підстанції О супроводжується зниженням кута навантаження до $35-40^\circ$

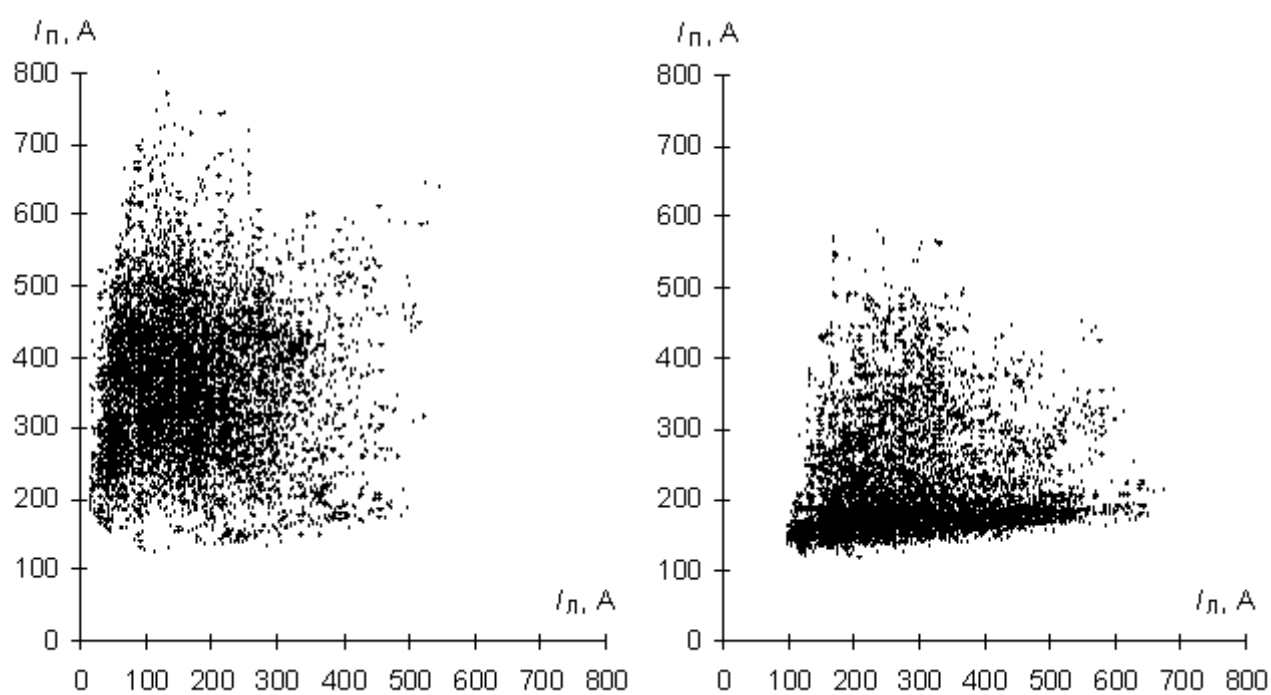
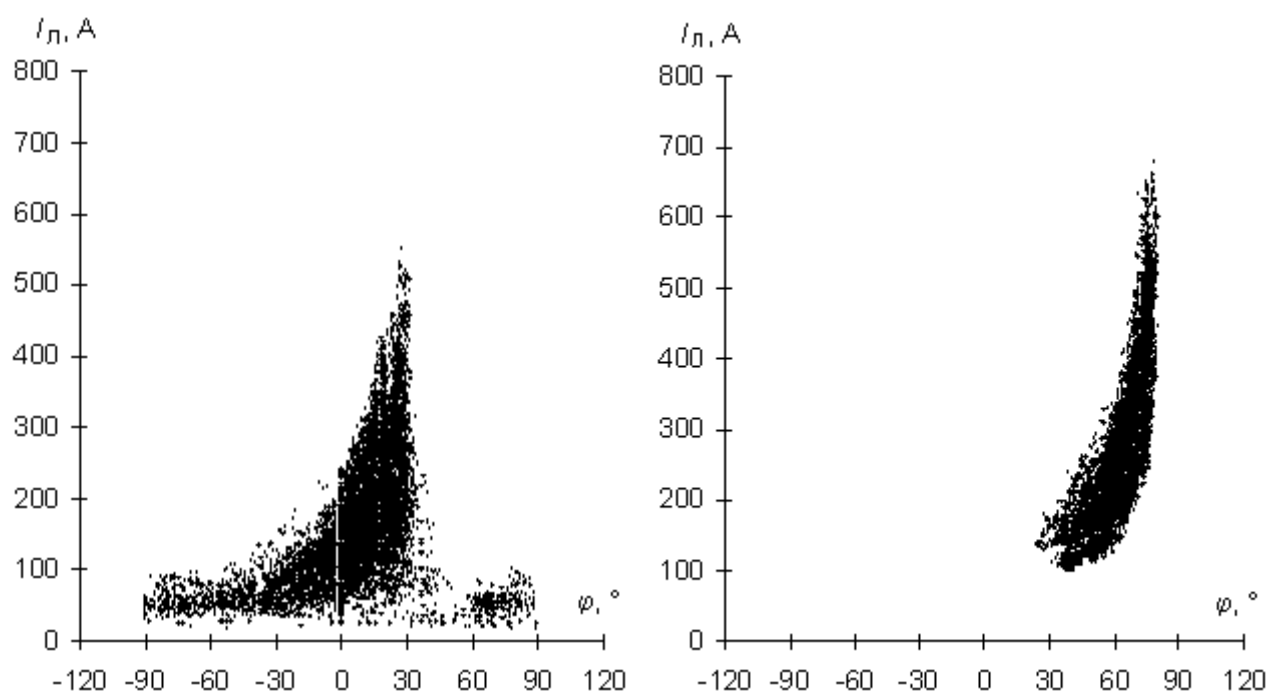


Рис. 4.10. Поля відносин струмів лівої та правої гілок живлення
тягових підстанцій З та О



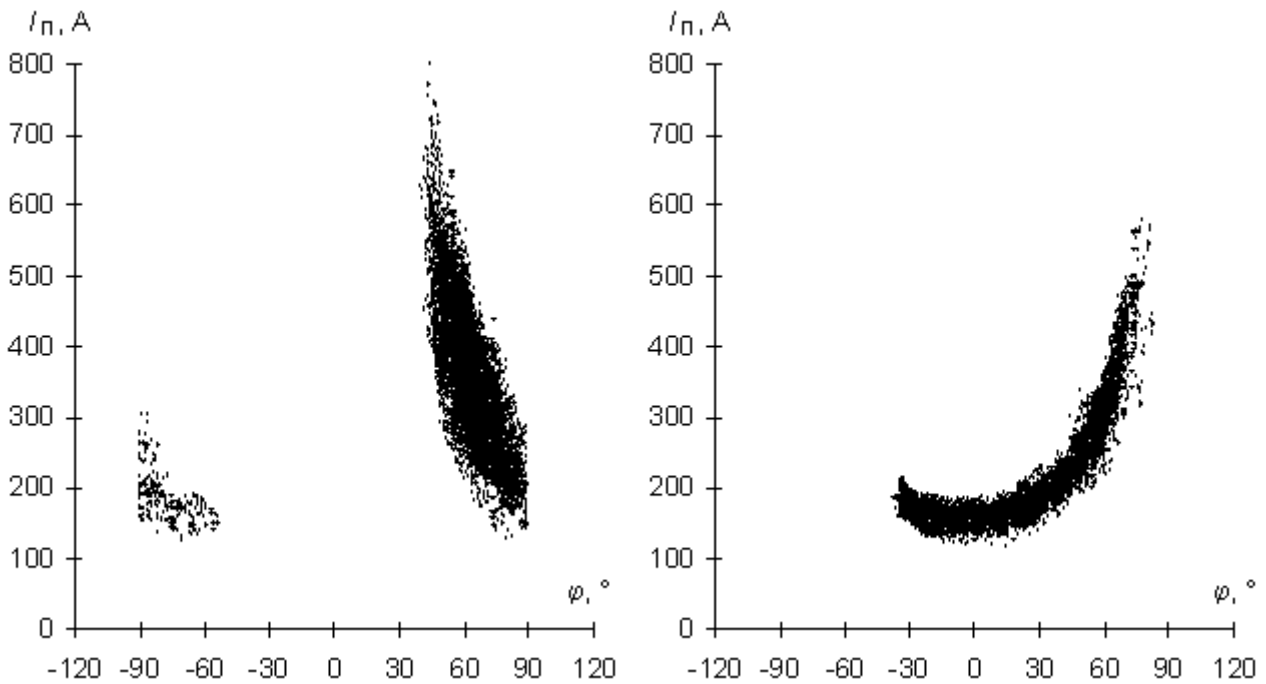


Рис. 4.11. Поля відносин струмів, що залежать від кута навантаження лівої та правої гілок живлення тягових підстанцій З та О

4.2. Вплив режиму роботи компенсуючих пристроїв на показники якості електроенергії

Аналіз порівняння вимірних коефіцієнтів несиметрії струмів відносно зворотної послідовності до відносин струмів гілок живлення з теоретичною залежністю, представлений на рисунку 4.12, свідчить про значне перевищення коефіцієнтом несиметрії струмів на підстанції О теоретично можливого, що може бути результатом помилки трансформатора струму на вводі 154 кВ через велике значення коефіцієнту трансформації (750/5) в порівнянні зі струмами навантаження (максимум 127,7 А; середнє 48,2 А; мінімум 6,6 А). Тому при подальшому аналізі не враховуватимемо виміряні струми в первинній мережі 154 кВ, а будемо орієнтуватися на значення струмів, зафіксованих в облікових кільцях на приєднаннях 27,5 кВ та 35 кВ.

Враховуючи наведене, ми можемо встановити розмір несиметрії струмів тягової підстанції за допомогою розрахунків, при цьому не враховуються помилки, що виникають через поглинання несиметрії струмів районною обмоткою тягового трансформатора (35 кВ).

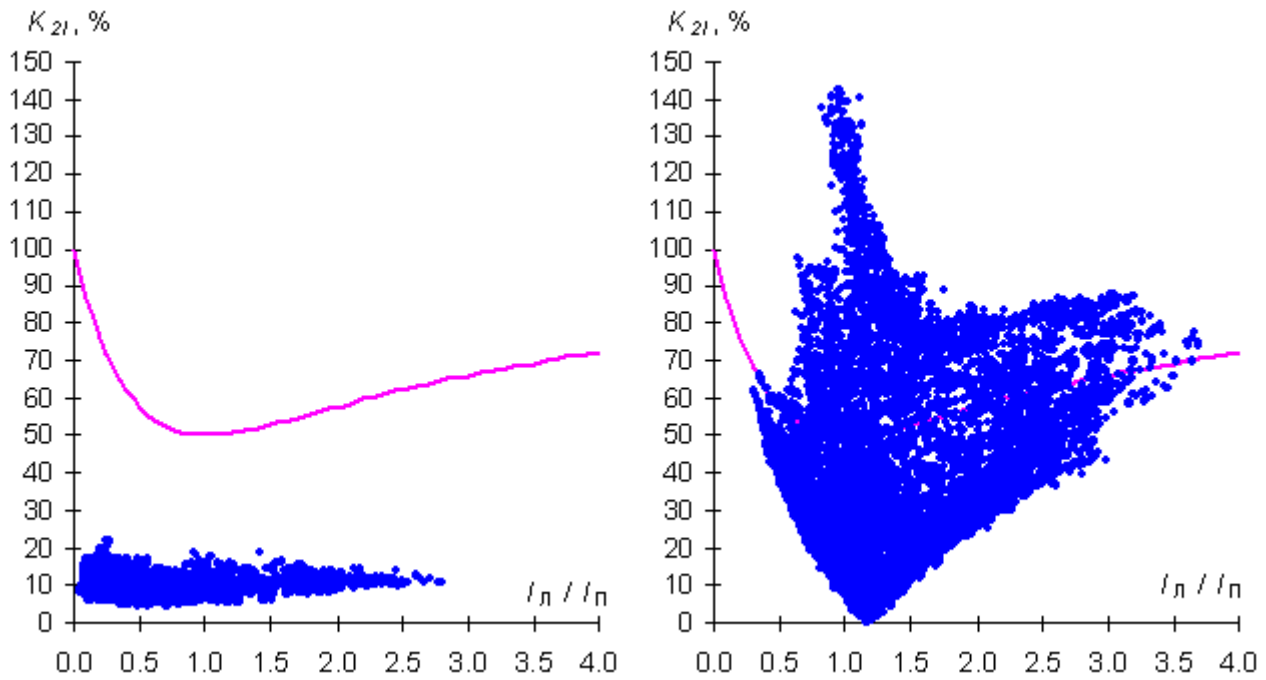


Рис. 4.12. Традиційна залежність коефіцієнта несиметрії струмів зворотній послідовності в мережі 154 кВ від пропорції струмів лівого та правого гілок живлення з нанесенням поля вимірних значень на підстанціях З та О

Для вивчення впливу компенсації реактивної потужності на несиметрію напруги в мережі районних споживачів 35 кВ було проведено побудову залежностей коефіцієнту K_{2U} від кута навантаження гілок живлення тягових підстанцій (рис.4.13, 4.14).

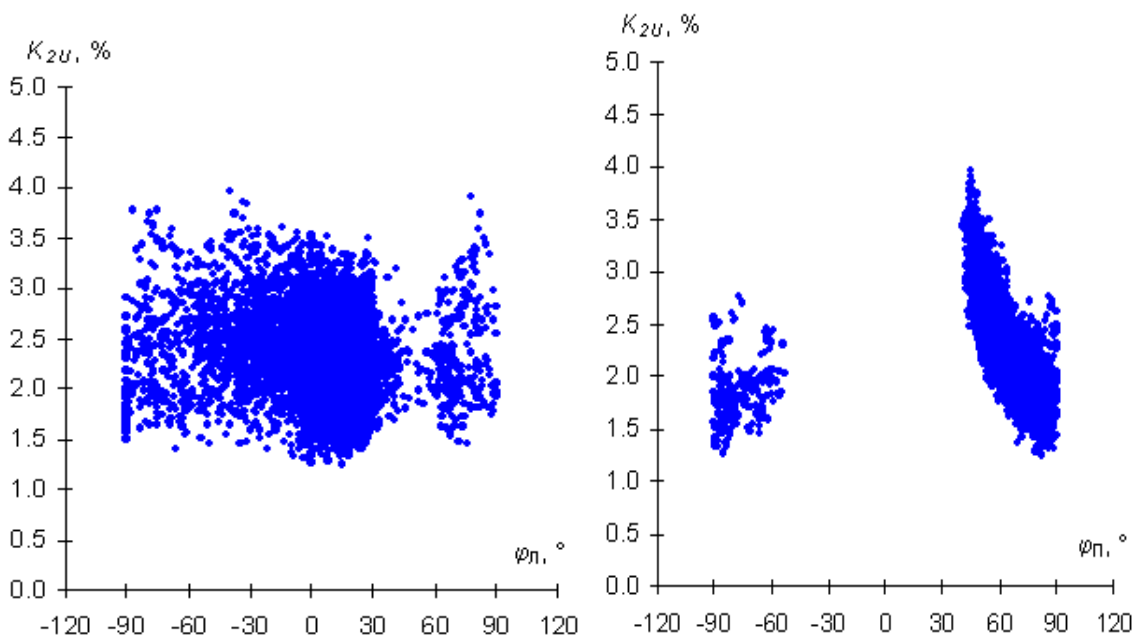


Рис. 4.13. Залежність коефіцієнту несиметрії напруги в мережі 35 кВ від кута навантаження лівого та правого гілок живлення підстанції З

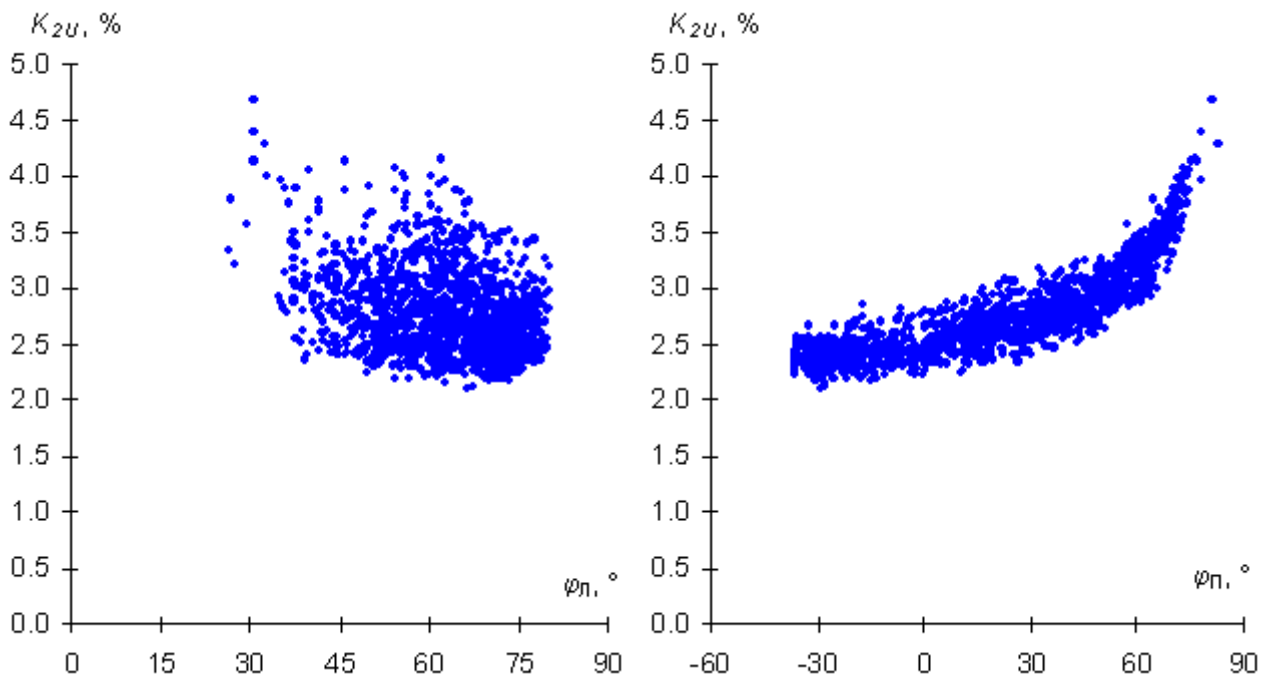


Рис. 4.14. Залежність коефіцієнту несиметрії напруги в мережі 35 кВ від кута навантаження лівого та правого гілок живлення підстанції О

Із наведених залежностей видно, що робочий режим компенсуючих пристроїв впливає на показник несиметрії напруги в мережі 35 кВ, при цьому, коригуючи кут тягового навантаження відповідної гілки живлення, можна досягти зниження несиметрії напруги, але водночас при симетризації можуть зрости витрати за перетікання реактивної потужності.

На тягових підстанціях Одеської залізниці почата експлуатація устаткування для регульованої компенсації реактивної потужності, тому зменшення несиметрії в мережі 35 кВ, у яку подається електроенергія від тягових підстанцій, є актуальним завданням, що може бути вирішеним за допомогою спеціального алгоритму управління режимом компенсації реактивної потужності.

ЗАКЛЮЧЕННЯ

1. При вимушеній схемі підключення ділянки Користівка – Кременчук, для дотримання напруги на блок-ділянці, на рівні не менше 21 кВ, необхідно встановити мінімальний міжпоїзний інтервал залежно від ваги поїзда в непарному напрямку (зі ст. Кременчука до ст. Користівка):

1200 т – 10 хв, 5000 т – 55 хв;

у парному напрямку (зі ст. Користівка до ст. Кременчук):

1200 т – 10 хв, 5000 т – 25 хв.

Не може бути більше 2 поїздів, які одночасно розташовані в одному фідері колії, для вказаних інтервалів.

Найбільш важким є пропуск вантажного поїзда вагою 5000 т, тому рекомендується не відправляти парні поїзди під електричною тягою зі станції Користівка, а також непарні поїзди з станції Кременчук (і проміжних станцій) до проходження великовантажного непарного поїзда станції Лікарівка (302,6 км). Значення інтервалів визначено за умовою, що поїзди проходять через ділянку Кременчук – Користівка без зупинок.

2. У ситуації петлевої схеми електропостачання ділянки (з включенням ПСК «Озера» або/та вимикачів контактної мережі «П1» 302пк9, «П1» 284пк8) напруга на лімітуючій ділянці контактної мережі збільшується приблизно на 0,5 кВ. Використання даної схеми в нормальній експлуатації не є доречним через зниження надійності релейного захисту (аварійні струми при короткому замиканні в кінці зони майже рівні робочим). Включити ПСК та згадані роз'єднувачі можна тільки тимчасово у випадку аварійної необхідності підвищення напруги в контактній мережі.

3. При зупинці руху поїздів на ділянці важливу передбачити можливість збільшити напругу в контактній мережі шляхом увімкнення ПСК, вказаних вимикачів та перемиканням положення РПН тягового трансформатора на ТП Олександрія. Щоб додатково запобігти транзитним перетокам потужності під час нормального електропостачання, положення РПН має відповідати

позиції, встановленій згідно з режимом напруги в мережі 154 кВ. На час проведення експериментальних досліджень такою була 12-а позиція.

4. Перед введенням в експлуатацію тягової підстанції на станції Кременчук, слід попередньо забезпечити можливість оперативного переходу на паралельну роботу тягових трансформаторів на підстанції Олександрія.

5. Пристрій автоматичної компенсації реактивної потужності на тяговій підстанції Олександрія можна використовувати як симетруючий.

6. Для ділянки залізничного перегону Знам'янка – Долинська не потрібно додаткових заходів щодо забезпечення проходження 60 пар поїздів за добу у звичайному режимі живлення.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Fricke E, Janiak N. Eisenbahntechnische Rundschau, 1996, 45, № 9, S. 531 – 534.
2. Інструкція з розрахунку наявної пропускної спроможності залізниць України [Текст]: Навч.-метод. посіб. / Розробники О.Ф. Вергун та ін. – К.: Транспорт України, 2002. – 376 с.
3. Бутько Т.В. Формування логістичної технології просування вантажопотоків за жорсткими нитками графіку руху поїзді/ Т.В. Бутько, Д.В. Ломотько, А.В. Прохорченко, К.О. Олійник // Збірник наукових праць УкрДАЗТ, 2009. – Вип.111. – С. 23-30.
4. Бутько Т.В. Розробка раціональних маршрутів прямування пасажирських поїздів на основі системи мурашиних колоній [Текст] / Т.В. Бутько, А.В. Прохорченко, Є.В. Чеклова // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2009. –Том 3. – 5(39). – С. 9-13.
5. Бутько Т.В. Обґрунтування доцільності впровадження подовжених пліч обертів локомотивів та локомотивних бригад при пропуску поїздів за «жорсткими» нитками графіка / БутькоТ.В., Прохорченко А.В., Костиркіна Т.О.// Збірник наукових праць УкрДАЗТ, 2010. - № 119. - С. 25-28.
6. Прохорченко А.В. Удосконалення технології роботи полігону мережі на основі організації групових поїздів за жорстким графіком руху / А.В.Прохорченко, Р.О. Євреїмов // Збірник наукових праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2010. Вип.114. С. 192-196.
7. Прохорченко, А.В. Розроблення моделі формування плану роботи сортувальної станції на основі теорії розкладу / А.В. Прохорченко, В.М. Прохоров, А.Ю. Постоленко // Збірник наукових праць УкрДАЗТ, 2011. Вип. 120 С. 38-43.

8. Козак, В.В. Розробка моделі розвитку інтегрованості міжнародних залізничних транспортних коридорів на стратегічному рівні планування перевезень/ В.В. Козак, Т.В. Бутко, А.В. Прохорченко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, – Харків, : УкрДАЗТ, 2011. –Вип. 3. – С. 36-41.

9. Бутко Т.В. Формування моделі розвитку залізничної системи швидкісних перевезень на основі принципів самоорганізації [Текст] / Т.В. Бутко, А.В. Прохорченко, Л.О. Пархоменко, І.В. Копаниця //Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях.- Харків: НТУ „ХПІ”, 2011. – № 54. – С. 67-70.

10. Бутко Т.В. Формування математичної моделі планування маршрутів слідування вагонів з небезпечними вантажами в умовах ризику/ Бутко Т.В., Прохорченко А.В., Музикіна С.І.// Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. – 2012. – №3(174). –С.18-23.

11. Бутко Т.В. Формування моделі оперативного управління процесом просування вагонів з небезпечними вантажами в підсистемі “технічна станція-прилегла дільниця” на базі нечіткої ситуаційної мережі / Т.В. Бутко, А.В. Прохорченко, С.І. Музикіна // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2012. – Вип.5. – С. 13-16.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А**ОХОРОНА ПРАЦІ***Організація робіт на тягових підстанціях*

Тягові підстанції в системі електропостачання електрифікованих залізниць перетворюють трифазний змінний струм, що отримується від енергосистем, в однофазний змінний струм напругою 27,5 кВ або в постійний струм напругою 3,3 кВ.

Тягові підстанції підрозділяються на опорні і проміжні залежно від схеми первинного електропостачання. Опорні тягові підстанції служать для розподілу електроенергії, що поступає від електричної системи; від їх шин відходять лінії електропередачі для живлення інших тягових підстанцій. Опорною вважається підстанція, до шин 110-220 кВ якою приєднується не менше трьох живлячих ліній електропередачі. Проміжні підстанції можуть бути проміжними або транзитними. Проміжні підключаються до відгалужень від ліній електропередачі, а транзитні - в розтин живлячих високовольтних ліній.

Експлуатація тягових підстанцій має бути організована так, щоб забезпечити безперебійне електропостачання електрорухомого складу, не тягових залізничних і районних споживачів. За організацію експлуатації, справний вміст і безперебійну роботу тягової підстанції, впровадження нової техніки і передових методів праці, економію засобів і електричної енергії несуть відповідальність начальники тягових підстанцій і начальники дистанцій електропостачання.

Оперативно-ремонтним персоналом на тяговій підстанції є начальник підстанції, електромеханік (старший електромеханік) по ремонту устаткування, електромеханіки по експлуатації, електромонтери.

В середньому на одну тягову підстанцію, наприклад по Одеській залізниці, доводиться 4,5 особи.

Начальник тягової підстанції здійснює технічне і господарське керівництво персоналом; планування і організацію своєчасного проведення робіт за змістом і ремонтом устаткування, а також по його посиленню і реконструкції; контролює якість робіт, що виконуються персоналом ремонтно-ревізійного цеху і будівельно-монтажних організацій; особисто організовує і здійснює проведення складних технологічних робіт; веде технічну, облікову і звітну документацію; організовує технічне навчання, періодичну перевірку знань персоналу підстанції, проведення днів охорони праці, підготовку кадрів для підстанції і так далі.

Старший електромеханік тягової підстанції (на деяких дистанціях енергопостачання ці функції покладені на електромеханіка по ремонту) безпосередньо здійснює ремонтні і профілактичні роботи на підстанції згідно річному графіку планово-запобіжних ремонтів (ППР) і оглядів. Він контролює зберігання і використання матеріалів, інструменту і інвентаря, стан будівлі і території і так далі. При необхідності він може замінити начальника тягової підстанції і чергового електромеханіка. При централізованому обслуговуванні підстанцій старший електромеханік виконує майже всі обов'язки, передбачені посадовою інструкцією начальника підстанції.

Черговий електромеханік повинен добре знати схеми всіх приєднань підстанції, умови роботи, призначення і уставки захисту всього устаткування, схеми автоматики, розташування, призначення і дію сигнальної апаратури, блокувань, допустимі навантаження і так далі. Він також повинен добре знати зовнішні ознаки, що передбачаються можливим пошкодженням і уміти усувати прості неполадки. При обслуговуванні підстанції оперативно-ремонтним персоналом електромеханіки можуть брати безпосередню участь у виробництві ремонтних робіт.

Електромонтери тягових підстанцій, як правило, мають 4-й або 5-й розряд і, відповідно, IV або V кваліфікаційну групу по техніці безпеки. Вони повинні уміти виконувати всі електромонтажні і потрібні слюсарні роботи, а також знати

устаткування, правила виробництва перемикачів і при необхідності виконувати обов'язки чергового персоналу. Електромонтери п'ятого і шостого розрядів можуть керувати ремонтною бригадою і при необхідності виконувати обов'язки електромеханіка по ремонту.

При централізованому обслуговуванні тягових підстанцій обслуговуючий персонал базової підстанції повинен ще знати і схеми всіх обслуговуваних бригадою підстанцій, що входять в ремонтну ділянку.

Матеріально-технічна база тягової підстанції складається з устаткування розподільних пристроїв: ВРП-220; 110; 35 кВ; ЗРП-10 кВ, а також ЗРП-3,3 кВ (на тягових підстанціях постійного струму) або РП-27,5 кВ змінного струму.

У ЗРП-10 кВ встановлено устаткування для електропостачання в основному не тягових споживачів: маломасляні або вакуумні вимикачі, роз'єднувачі, прилади контролю і обліку, релейний захист фідерів.

У РП-27,5 кВ використовуються масляні і вакуумні вимикачі.

Серцем підстанції називають акумуляторну батарею. Тут встановлюються зазвичай 50-100 акумуляторів залежно від величини напруги оперативного струму. Звідси живляться ланцюги управління релейного захисту і котушки управління вимикачів. Акумуляторне приміщення має припливно-витяжну вентиляцію. Більшість акумуляторів працюють в режимі постійного підзаряду, тому головний щит підстанції має бути укомплектований зарядно-підзарядним пристроєм.

Від шин 10 кВ тяговій підстанції живляться високовольтні лінії з резервним живленням від дизель-генераторної установки, яка також розташовується на тяговій підстанції. Панелі управління тяговою підстанцією займають чимале приміщення, де розташовані ключі дистанційного керування комутаційними апаратами. Крім того, на пульті є сигналізація положення основних комутуючих апаратів, прилади контролю і обліку електроенергії, апаратура релейного захисту введів, силових трансформаторів, трансформаторів

власних потреб, пристрої телекерування і телесигналізації. Оперативний зв'язок з енергодиспетчером здійснюється по телефону, селектору.

Планування і організацію робіт персоналу тягової підстанції визначає річний план проведення ППР з розбиттям по місяцях. У ньому вказуються всі роботи, що проводяться оперативним персоналом, по яких начальник підстанції відчитується щомісячно.

На одній з підстанцій, як правило, опорної, створюють комплексну бригаду і базу для проведення майже всіх видів ремонту та обслуговування, оснащену необхідними випробувальними установками, приладами та пристроями, а також автотранспортними засобами. Така бригада для 3-4 підстанцій складається з 5-6 чоловік під керівництвом старшого електромеханіка.

На інших підстанціях, що входять в централізоване обслуговування, залишається оперативно-ремонтний експлуатаційний штат не більше 2-3 чоловік, включаючи старшого електромеханіка. До їхніх обов'язків входить здійснення оперативних перемикань, допуск до роботи ремонтних бригад, участь у ремонтних роботах і, при необхідності, оперативне втручання в аварійні ситуації. Крім того, вони займаються поточними господарськими роботами.

Загальний штат такого централізованого обслуговування з 3 підстанцій (опорна ТП з чергуванням в 1 особа, і дві проміжні з оперативно-ремонтним персоналом) становить 15 осіб, або 5 чоловік на підстанцію. У той же час при роздільному обслуговуванні таких підстанцій загальний штат складає 16-19 чоловік, тобто 6 осіб на одну підстанцію. Таким чином, трудовитрати зменшуються на 20%.