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

“Допущено до захисту”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор
_____Петро ПЛЄШКОВ
“___“ _____2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої освіти

на тему:

«Аналіз способів та заходів зі зниження впливу несиметрії напруг і струмів тягових навантажень Analysis of methods and measures to reduce the impact of asymmetry of traction load voltages and currents»

Виконав здобувач вищої освіти
ІІ курсу магістратури, групи ЕЕ-22М
ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання»
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
_____ Олег МИРОНЮК
«____»_____2023 р.

Керівник роботи
к.т.н, доцент
_____ Олександр СІРІКОВ
«_____»_____2023 р.

Рецензент _____
_____

м. Кропивницький, 2023

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет *будівництва та транспорту*
Кафедра *електротехнічних систем та енергетичного менеджменту*
Рівень вищої освіти *другий (магістерський)*
Галузь знань *14 «Електрична інженерія»*
Спеціальність
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Освітньо-професійна (освітньо-наукова) програма
Електротехнічні системи електроспоживання

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Завідувач кафедри
_____ Петро ПЛЄШКОВ
«_____»_____2023 р.

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

Миронюка Олега Сергійовича
(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи *Аналіз способів та заходів зі зниження впливу несиметрії напруг і струмів тягових навантажень*
Analysis of methods and measures to reduce the impact of asymmetry of traction load voltages and currents

2. Керівник роботи *Сіріков Олександр Іванович, к.т.н., доцент*
(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання роботи до захисту *20.12.2023 р.*

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи *Метою роботи є аналіз способів та заходів зі зниження впливу несиметрії напруг і струмів тягових навантажень. Завдання роботи: системи електропостачання електрифікованих залізниць; схеми приєднання тягових підстанцій на ділянках змінного струму до зовнішньої і тягової мережі; несиметрія струмів і напруг, що виникає в системі електропостачання на ділянках змінного струму; про можливі способи перетворення однофазних навантажень в рівномірну трифазну; охорона праці.*

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	*к.т.н., доц. Савеленко І.В.*		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	*Вступ*	*13.10.23*	
2	*Системи електропостачання електрифікованих залізниць*	*27.10.23*	
3	*Схеми приєднання тягових підстанцій на ділянках змінного струму до зовнішньої і тягової мережі*	*10.11.23*	
4	*Несиметрія струмів і напруг, що виникає в системі електропостачання на ділянках змінного струму*	*24.11.23*	
5	*Про можливі способи перетворення однофазних навантажень в рівномірну трифазну*	*08.12.23*	
6	*Охорона праці*	*15.12.23*	
7	*Висновки*	*18.12.23*	
8	*Оформлення кваліфікаційної роботи та презентації до неї*	*20.12.23*	

Дата видачі завдання
«____» _____ 2023 р.
Підпис керівника
_____ Сіріков О.І.
(прізвище та ініціали)

Завдання прийнято до виконання
«____» _____ 2023 р.
Підпис здобувача
_____ Миронюк О.С.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Миронюк О.С. Аналіз способів та заходів зі зниження впливу несиметрії напруг і струмів тягових навантажень.

Кваліфікаційна робота за другим (магістерським) рівнем вищої освіти за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньо-професійна програма «Електротехнічні системи електроспоживання», Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2023.

Метою кваліфікаційної роботи є аналіз способів та заходів зі зниження впливу несиметрії напруги і струмів тягових навантажень.

Електротехнічна система електричної тяги однофазного змінного струму 25 кВ, 50 Гц за своєю специфікою здійснює несиметричний відбір електричної енергії з трьохфазної енергосистеми. Внаслідок цього зовнішня система трьохфазного електропостачання навантажується несиметричними фазними струмами, що призводить до виникнення несиметрії напруги в електричний мережі енергосистеми.

Несиметрію напруги, обумовлену несиметричними електроприймачами, можна обмежити до прийнятних значень, як за допомогою схемних рішень, так і шляхом застосування спеціальних симетрувальних пристроїв.

Для тягових споживачів в якості схемних рішень використовується схеми «гвинта» при односторонньому живлені або «зустрічного гвинта» при двосторонньому живленні. Відповідно для повного циклу приєднання потрібні три та шість тягових підстанцій відповідно. Дане схемне рішення забезпечує повне симетрування при однаковому навантажені плечей кожної тягової підстанції. Заходом зі зниження несиметрії струмів та напруг є використання на тягових підстанціях схеми Скотта. Такий симетрувальний пристрій дозволяє при симетричному завантаженні плечей повністю виключити несиметрію струмів і, як наслідок, напруги в зовнішній системі електропостачання.

Ключові слова: несиметрія напруги і струмів, тягові підстанції, однофазний струмоприймач, схемні рішення, пристрої симетрування.

ABSTRACT

Mironyuk O.S. Analysis of methods and measures to reduce the impact of asymmetry of traction load voltages and currents

Qualification work for the second (master's) level of higher education in specialty 141 «Electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics», educational and professional program «Electrotechnical systems of electricity consumption», Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2023.

The purpose of the qualification work is the analysis of methods and measures to reduce the impact of asymmetry of voltage and currents of traction loads.

The electrotechnical system of electric traction of single-phase alternating current 25 kV, 50 Hz, according to its specificity, carries out asymmetric selection of electric energy from a three-phase power system. As a result, the external three-phase power supply system is loaded with asymmetric phase currents, which leads to voltage asymmetry in the electrical network of the power system.

The voltage asymmetry caused by asymmetric electric receivers can be limited to acceptable values, both with the help of circuit solutions and by using special balancing devices.

For traction consumers, circuit solutions use the «screw» circuit with one-way power supply or the «counter-screw» circuit with two-way power supply. Accordingly, three and six traction substations are required for a full connection cycle, respectively. This schematic solution provides full symmetrization with the same load on the shoulders of each traction substation. A measure to reduce the asymmetry of currents and voltages is the use of the Scott scheme at traction substations. Such a balancing device makes it possible to completely eliminate asymmetry of currents and, as a result, voltages in the external power supply system with symmetrical loading of the shoulders.

Key words: asymmetry of voltage and currents, traction substations, single-phase current collector, schematic solutions, balancing devices.

ЗМІСТ

ВСТУП 8

РОЗДІЛ 1 СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЗАЛІЗНИЦЬ 10

1.1 Принципова схема системи електропостачання електрифікованої залізниці і характерні особливості умов її роботи 10

1.2 Система електропостачання змінного однофазного струму промислової частоти 50 Гц напругою 25 кВ 13

1.3 Схеми приєднання тягових підстанцій до ліній електропередачі 15

РОЗДІЛ 2 СХЕМИ ПРИЄДНАННЯ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ НА ДІЛЯНКАХ ЗМІННОГО СТРУМУ ДО ЗОВНІШНЬОЇ І ТЯГОВОЇ МЕРЕЖІ 18

2.1 Тягові підстанції з трифазними трансформаторами 18

2.2 Тягові підстанції з однофазними трансформаторами, з'єднаними за схемою відкритого трикутника 36

2.3 Тягові підстанції з однофазними трансформаторами, з'єднаними за схемою Скотта 43

2.4 Система тягового електропостачання з симетрувальним трансформатором на опорних підстанціях 48

РОЗДІЛ 3 НЕСИМЕТРІЯ СТРУМІВ І НАПРУГ, ЩО ВИНИКАЄ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА ДІЛЯНКАХ ЗМІННОГО СТРУМУ 51

3.1 Причини виникнення несиметрії струмів і напруг на ділянках змінного струму 51

3.2 Показники, що характеризують величину несиметрії струмів і напруг 55

3.3 Негативні наслідки несиметрії струмів і напруг. Допустимі значення коефіцієнтів несиметрії 58

РОЗДІЛ 4 СПОСОБИ ПЕРЕТВОРЕННЯ ОДНОФАЗНИХ НАВАНТАЖЕНЬ В РІВНОМІРНУ ТРИФАЗНУ 63

4.1 Випадок одного однофазного тягового навантаження 63

4.2 Випадок двох однофазних навантажень 67

4.3 Коефіцієнт несиметрії струмів, обумовлений навантаженням однієї тягової підстанції..... 71

4.4 Розрахунок несиметрії струмів та напруг в системі електропостачання тягових підстанцій 76

РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ 80

5.1 Причини нещасних випадків на виробництві та заходи захисту від них 80

5.2 Заземлення трансформаторних підстанцій споживачів, що живляться від тягових мереж 82

5.3 Основні організаційно-технічні заходи з техніки безпеки..... 88

ВИСНОВКИ..... 93

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 95

ВСТУП

Актуальність роботи. Система електричної тяги однофазного змінного струму з напругою 25 кВ та частотою 50 Гц, за своєю природою, виконує несиметричний відбір електроенергії з трьохфазної електроенергетичної системи. Це призводить до того, що зовнішня система отримує навантаження несиметричними фазовими струмами, що в свою чергу спричиняє несиметрію напруги в електричній мережі.

Несиметрія струмів викликає ряд негативних наслідків:

– збільшення втрат електроенергії через нерівномірність завантаження фаз у системі електропостачання;

– зменшення пропускної здатності ліній та трансформаторів енергосистеми;

– неповне використання потужності трансформаторів та генераторів;

– додаткове нагрівання обмоток електродвигунів та генераторів;

– виникнення несиметрії напруги в вузлах електромережі.

Несиметрія напруги, в свою чергу, призводить до таких негативних наслідків:

– зниження механічної потужності електродвигунів;

– підвищене нагрівання трансформаторів, з чим пов'язано пришвидшене скорочення їхнього терміну служби;

– нестійка робота перетворювачів частоти.

Зменшити несиметрію напруги, що виникає внаслідок підключення однофазних електричних приймачів, можна до прийнятних значень за допомогою схемних рішень. У випадках, коли неможливо досягти необхідного рівня несиметрії напруг за допомогою схемних рішень, можуть бути використані спеціальні симетрувальні пристрої.

Існує достатнє різноманіття, як схемних так і технічних рішень зменшення несиметрії напруги та струму, що викликана однофазними тяговими навантаженнями. Отже, огляд та аналіз способів та заходів зі зниження впливу несиметрії напруг і струмів тягових навантажень безперечно має важливе практичне значення та розглядається в даній магістерській роботі.

Мета роботи і задачі дослідження. Метою кваліфікаційної роботи є аналіз способів та заходів зі зниження впливу несиметрії напруги і струмів тягових навантажень.

Для досягнення вказаної мети потрібно розв’язати наступні задачі:

1. Розглянути системи електропостачання електрифікованих залізниць.
2. Розглянути схеми приєднання тягових підстанцій на ділянках змінного струму до зовнішньої і тягової мережі.
3. Оцінити несиметрію струмів і напруг, що виникає в системі електропостачання на ділянках змінного струму від тягових навантажень.
4. Проаналізувати можливі способи перетворення однофазних навантажень в рівномірну трифазну.

Об'єкт дослідження електропостачання тягових споживачів електрифікованих залізниць.

Предмет дослідження способи та заходи зі зниження впливу несиметрії напруги і струмів тягових навантажень.

Методи досліджень базуються на використанні: законів електротехніки, математичному моделюванню енергетичних та електромагнітних процесів при несиметричних режимах роботи трифазних систем електропостачання.

Основні практичні результати, їх значення.

1. Для тягових споживачів в якості схемних рішень необхідно застосовувати схеми «гвинта» при односторонньому живлені або «зустрічного гвинта» при двосторонньому живленні. Дане схемне рішення забезпечує повне симетрування при однаковому навантажені плечей кожної тягової підстанції.

2. Заходом зі зниження несиметрії струмів та напруг є використання на тягових підстанціях схеми Скотта. Вона дозволяє при симетричному завантаженні плечей повністю виключити несиметрію струмів і, як наслідок, напруги в зовнішній системі електропостачання.

РОЗДІЛ 1
СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЗАЛІЗНИЦЬ

1.1 Принципова схема системи електропостачання електрифікованої залізниці і характерні особливості умов її роботи

Електрифіковані залізниці отримують електричну енергію від енергосистем, які об'єднують в собі декілька електростанцій. Електрична енергія, що виробляється генераторами кожної електростанції, передається тяговим навантаженням (електричним локомотивам) через підвищуючи трансформаторні підстанції, лінії електропередачі різної напруги і тягові підстанції. На останніх електрична енергія перетворюється до виду (за типом струму та рівнем напруги), що використовується на вході електричними локомотивами, і вже по тяговій мережі (контактна мережа, рейки) передається до них.

Вся сукупність пристроїв, починаючи від генератора електростанції і закінчуючи тяговою мережею, становить систему електропостачання електрифікованої залізниці (рис. 1.1). Від цієї системи електричною енергією живляться крім електричної тяги, ще і нетягові залізничні споживачі і споживачі прилеглих до залізниць районів.

Система електропостачання повинна забезпечувати надійне живлення електрорухомого складу для руху поїздів із встановленими нормами маси, швидкостями та інтервалами між ними при заданих розмірах руху, також пристроїв сигналізації, централізації та блокування, зв'язку і обчислювальної техніки [1].

Як правило, електрифікована залізниця отримує живлення від енергосистеми, а не від однієї електричної станції, як це умовно показано на принциповій схемі рис. 1.1. Енергосистема є сукупністю генераторів електростанцій, електричних мереж, підстанцій, об'єднаних спільністю виробництва, передачі, розподілу та споживання електричної енергії.

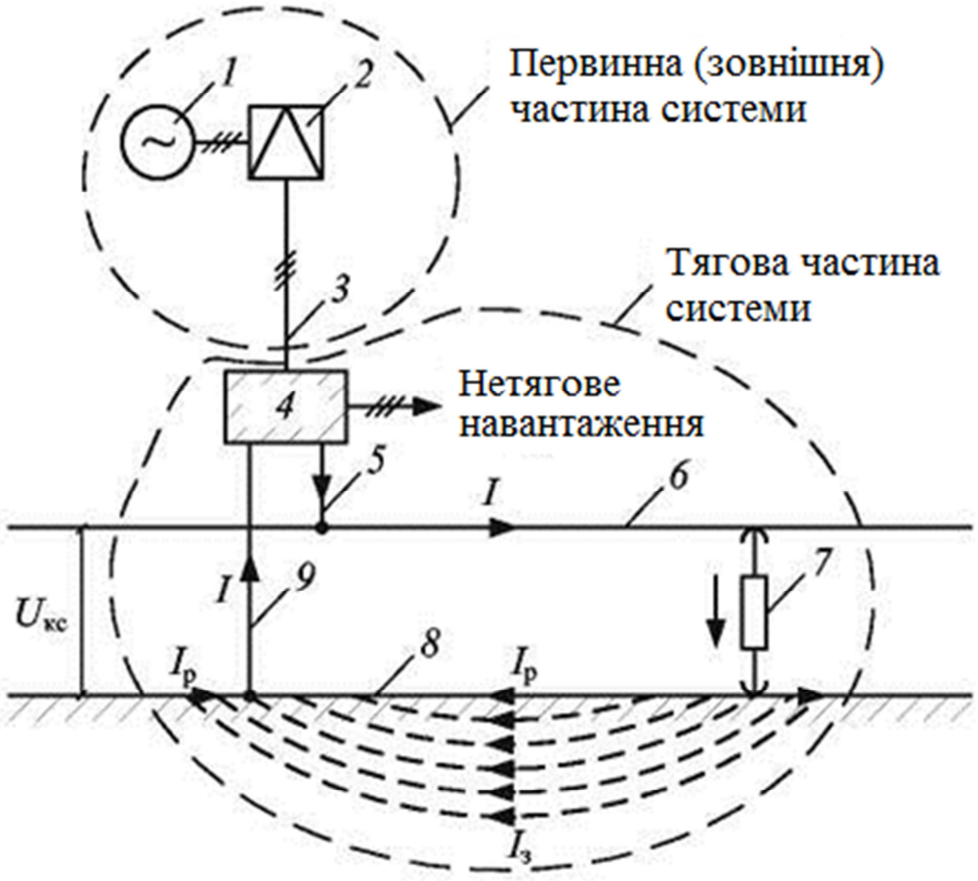


Рис. 1.1. Принципова схема системи електропостачання електрифікованої залізниці:

1 – електростанція; *2* – підвищуюча трансформаторна підстанція (для підвищення напруги, отриманої на затискачах генератора до напруги лінії електропередачі); *3* – лінія електропередачі; *4* – тягова підстанція; *5* – лінія живлення тягової підстанції; *6* – контактна мережа; *7* – електрорухомий склад; *8* – рейки; *9* – відсмоктувальна лінія (лінія зворотного струму) тягової підстанції

В системі електропостачання електрифікованої залізниці можна виділити дві частини:

– первинну (або зовнішню), яка включає в себе всі елементи від електричної станції до тягової підстанції;

– тягову, що складається з тягових підстанцій і тягової мережі, яку називають системою тягового електропостачання [2].

Тягова мережа складається з контактної мережі, рейкового шляху, живлячих і відсмоктувальних ліній (фідерів) тягових підстанцій, а також інших пристроїв, приєднаних тим чи іншим чином до контактної мережі і рейок по довжині ділянки залізниці.

Системі електропостачання електрифікованої залізниці притаманний ряд

характерних особливих умов роботи:

1. Рівні напруги в зовнішній і тяговій частинах системи електропостачання різні, в окремих системах ще і різний рід струму.

2. Кількість живлячих проводів у зовнішній і тяговій частинах системи електропостачання, як правило, не збігається.

3. Частина тягового струму електровоза I при поверненні його на тягову підстанцію по рейках $I_р$ протікає по землі $I_з$ (рис. 1.1) - це так звані блукаючі струми.

4. Тягові підстанції крім тягового навантаження живлять і нетягове навантаження.

Зазначені особливості умов роботи системи визначають особливості її роботи з точки зору струморозподілу в окремих елементах системи і характеру зміни напруги в них.

Системи електропостачання електрифікованих залізниць класифікують за родом струму в контактній мережі і величиною напруги в ній.

Розрізняють такі основні різновиди системи електропостачання електрифікованої залізниці:

1. Система електропостачання постійного струму напругою 3 кВ або 1,5 кВ.

2. Система електропостачання змінного однофазного струму промислової частоти 50 Гц напругою 25 кВ.

3. Система електропостачання змінного однофазного струму зниженої частоти 16⅔ Гц напругою 15 кВ.

В даний час в світі електрифіковано 25% (приблизно 242 тис. км) загальної протяжності залізниць. На цьому полігоні виконується близько 50% світового обсягу перевезень [3].

Система змінного струму використовується на ділянках, довжина яких становить 55,1% загальної протяжності електрифікованих ліній (система 25 кВ, 50 Гц – 40,5%, система 15 кВ, 16⅔ Гц – 14,6%). За системою постійного струму електрифіковано 43% (система 3 кВ – 35,2%, система 1,5 кВ – 7,8%). На інші

системи електропостачання (змінного струму 50 кВ, 50 Гц; 11-13 кВ, 25 Гц; 15 кВ, 20 Гц і постійного струму 0,75 і 0,6 кВ) припадає близько 2%.

В даний час найбільша протяжність електрифікованих ліній в Китаї – 48 тис. км, на другому місці росія – 44 тис. км і на третьому Німеччина – 21 тис. км.

1.2 Система електропостачання змінного однофазного струму промислової частоти 50 Гц напругою 25 кВ

Для електрифікації залізниць змінний струм при напрузі 750 В і частоті 42 Гц вперше був застосований в 1898 р.

В Італії в 1902 р. було відкрито електрифіковану дільницю трифазного струму напругою 3000 В з частотою 15 Гц.

Надалі набула поширення розроблена в 1901-1906 рр. система електропостачання однофазного струму зниженої частоти 16⅔ Гц при напрузі в контактній мережі 15 кВ. Розробка і застосування цієї системи була викликана складнощами, що виникли при експлуатації системи трифазного струму, і недостатньою економічністю системи постійного струму при порівняно невеликих напругах в тягової мережі. Застосування зниженої частоти обумовлено складнощами при створенні потужних економічних і надійних однофазних колекторних тягових двигунів. Вперше ця система застосована в Швейцарії.

Система електропостачання однофазного струму промислової частоти при напрузі в контактній мережі 15 кВ була застосована в 1932 р при електрифікації ділянки протяжністю 187 км під Будапештом. Дана система в 1950-55 рр. отримала широке поширення у Франції, але вже при напрузі 25 кВ. Така система електропостачання з 1958 року почала застосовуватися на Східно-Сибірській залізниці, а потім на Північно-Кавказькій та інших дорогах.

Принципова схема даної системи електропостачання приведена на рис. 1.2. Цифрові позначення окремих елементів на цьому рисунку ті ж, що і на рис. 1.1. Однофазний трансформатор і випрямляч, встановлені на електровозі, показані відповідно як *11* і *12*.

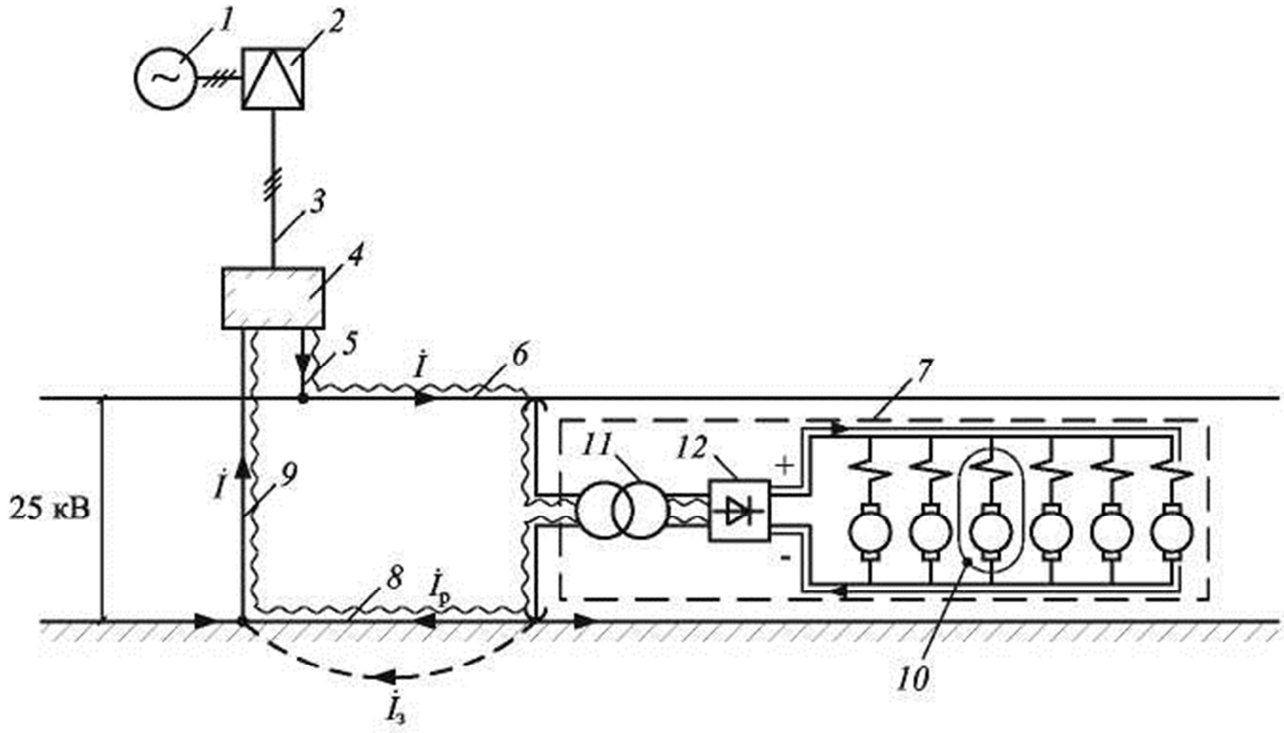


Рис. 1.2. Принципова схема системи електропостачання однофазного струму промислової частоти напругою 25 кВ:

———— ланцюг постійного струму; ~~~~~~~~~~ ланцюг змінного струму

На переважній більшості електровозів та електропотягів змінного струму, що використовуються в даний час на ділянках, застосовуються двигуни постійного струму з послідовним збудженням. Шестивісний електровоз змінного струму умовно зображений на рис. 1.2. У тяговій частині системи електропостачання виділені елементи, по яких протікає змінний і постійний струм.

До переваг системи електропостачання однофазного струму промислової частоти при порівнянні її з системою постійного струму відносять:

– більш високі напруги в контактній мережі (25 кВ замість 3 кВ), що дозволяє істотно збільшити відстань між тяговими підстанціями (40-60 км) і в 2-3 рази зменшити перетин контактної підвіски;

– простіші тягові підстанції, на яких встановлюється тільки трансформаторне обладнання;

– практично відсутня електрокорозія підземних металевих споруд.

Система змінного струму при порівнянні її з системою електропостачання постійного струму має певні недоліки:

– низький коефіцієнт потужності, в середньому 0,8;

– нерівномірне завантаження фаз зовнішньої частини системи електропостачання, так як кожна тягова підстанція змінного струму живить від трифазної симетричної мережі два однофазних ланцюга (ліворуч і праворуч від підстанції), що призводить до несіметрії струмів і напруг, що негативно впливають на роботу окремих елементів системи та споживачів;

– сильний електромагнітний вплив на провідні лінії зв'язку, що йдуть вздовж залізничної дороги;

– складні електровози, так як на них, в порівнянні з електровозами постійного струму, додатково встановлюють однофазний трансформатор та випрямляч (рис. 1.2).

1.3 Схеми приєднання тягових підстанцій до ліній електропередачі

Електрифіковані залізниці, як споживач електричної енергії відносяться до споживачів першої категорії, оскільки перерва в їх роботі приносить значну шкоду всім галузям виробництва. Вихід з роботи однієї підстанції (секції шин) енергосистеми або живильної лінії не повинен призводити до відключення тягової підстанції [2]. Для цього тягові підстанції повинні мати, як правило, двостороннє живлення від двох підстанцій енергосистеми або по двом радіальним лініям від різних систем шин однієї підстанції енергосистеми, що має не менше двох джерел живлення. Від двохланцюгової тупикової повітряної лінії електропередачі допускається живлення не більше однієї тягової підстанції [2].

Розрізняють три основні схеми двостороннього живлення тягових підстанцій від ліній електропередачі (ЛЕП):

– по одноланцюговим ЛЕП;

– дволанцюговим ЛЕП (підвішування обох ланцюгів на загальних опорах);

– двом одноланцюговим ЛЕП (кожна ЛЕП на своїх опорах).

При побудові схеми живлення тягових підстанцій від ЛЕП враховують, що

тягова підстанція може бути опорною (підстанція, що отримує живлення від мережі зовнішньої частини системи електропостачання по трьом і більше лініям електропередачі) або проміжною. Остання може бути або відпаяною, що отримує живлення відгалуженням від ЛЕП, або транзитною, включеною у розтин ЛЕП. Кількість проміжних підстанцій між двома опорними визначається вимогою забезпечення необхідної надійності їх роботи.

При двосторонньому живленні підстанцій по одноланцюговій ЛЕП кількість проміжних підстанцій (в тому числі підстанцій, які не живлять тягу), що включаються у розтин ЛЕП між опорними підстанціями, як правило, не повинна бути більше трьох [2], рис. 1.3. Приєднання тягових підстанцій до одноланцюгових ЛЕП на відгалуженнях не допускається.

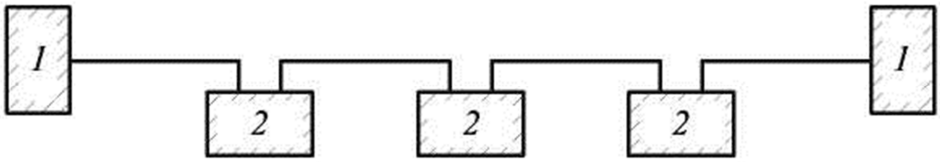


Рис. 1.3. Схема живлення тягових підстанцій по одноланцюговій ЛЕП:

1 – опорна тягова підстанція; *2* – транзитна тягова підстанція.

Від двохланцюгової ЛЕП на ділянці між двома опорними тяговими підстанціями рекомендується забезпечувати живлення наступної кількості проміжних підстанцій (включаючи підстанції, котрі не мають тягу) [2]:

– для ПЛ 220 кВ – не більше п'яти при електричній тязі, як на постійному, так і на змінному струмі, рис. 1.4, 1.5;

– ЛЕП 110 кВ – не більше п'яти при електричній тязі на постійному струмі і трьох – на змінному струмі (рис. 1.4, 1.5). Приєднання тягових підстанцій до двохланцюгової ЛЕП на відгалуженнях не допускається.

При живленні тягових підстанцій від двох одноланцюгових ЛЕП допускається частину проміжних підстанцій приєднувати до ЛЕП на відгалуженнях (відпайках), рис. 1.5.

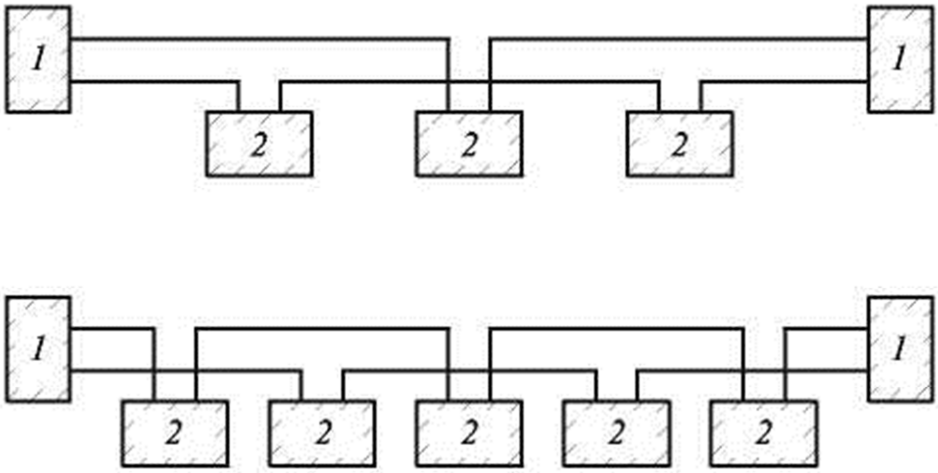


Рис. 1.4. Схеми живлення тягових підстанцій по двохланцюговим ЛЕП на загальних опорах:

1 – опорна підстанція; *2* – транзитна підстанція.

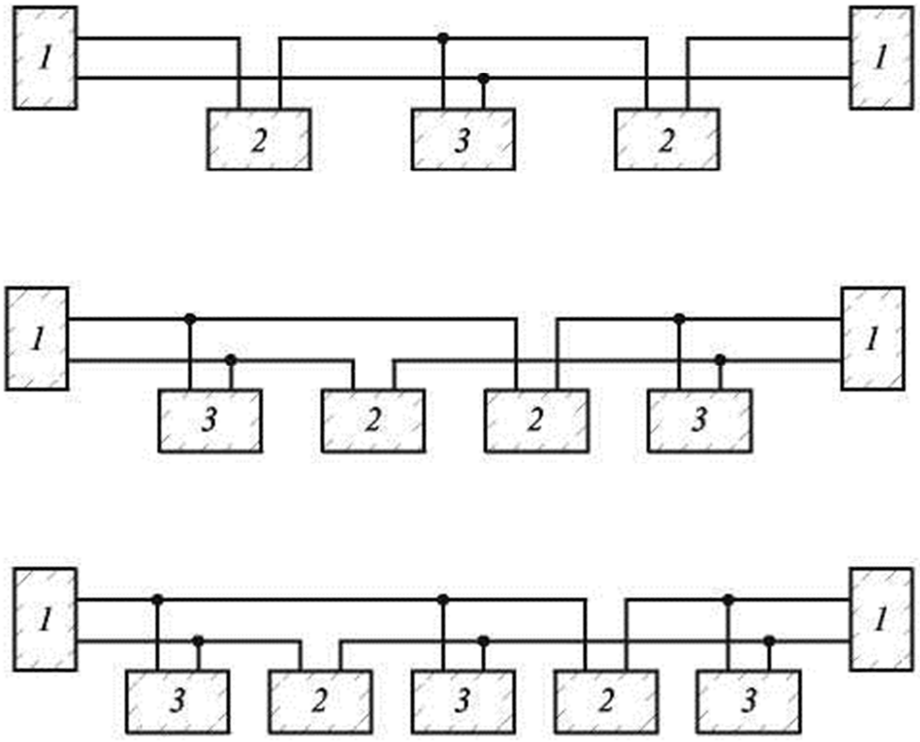


Рис. 1.5. Схеми живлення тягових підстанцій по двом одноланцюговим ЛЕП:

1 – опорна підстанція; *2* – транзитна підстанція; *3* – відпайна підстанція

Відпайні і транзитні підстанції між двома опорними повинні чергуватися так, щоб при будь-якому пошкодженні на ЛЕП (навіть вихід з ладу двох ланцюгів лінії) відключалася не більше однієї підстанції. Рекомендована кількість проміжних підстанцій для цього випадку, така ж, як і в разі живлення від дволанцюгової ЛЕП. Схеми живлення для різної кількості проміжних підстанцій між двома опорними наведені на рис. 1.5.

РОЗДІЛ 2
СХЕМИ ПРИЄДНАННЯ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ НА ДІЛЯНКАХ ЗМІННОГО СТРУМУ ДО ЗОВНІШНЬОЇ І ТЯГОВОЇ МЕРЕЖІ

На тягових підстанціях змінного струму для живлення тягових навантажень можуть застосовуватися як однофазні, так і трифазні трансформатори. Типи трансформаторів і схеми з'єднання їх обмоток, схеми приєднання трансформаторів до зовнішньої і тягової мереж тісно пов'язані між собою. В даний час на більшості тягових підстанцій змінного струму застосовуються трифазні трансформатори.

2.1 Тягові підстанції з трифазними трансформаторами

Трифазні трансформатори, що встановлюються для живлення тягових навантажень, як правило, трьохобмоточні зі схемою з'єднання обмоток Y/Y/Δ-0-11 або Y/Δ/Δ-11-11. Одна з обмоток нижчої напруги призначена для живлення нетягового навантаження і з'єднується або в зірку при напрузі 35 кВ, або в трикутник при напрузі 10(6) кВ. Обмотка для живлення тягового навантаження напругою 27,5 кВ завжди з'єднана в трикутник.

Одиночна тягова підстанція. Для випадку одиночної тягової підстанції її схема приєднання до зовнішньої і тягової мереж наведена на рис. 2.1 (обмотка для живлення нетягового навантаження не зображена).

На підстанції, що розглядається виводи первинної обмотки трансформатора приєднуються до фаз ЛЕП відповідно до їх заводського маркування, тобто фаза А трансформатора приєднується до фази А ЛЕП, фаза В – до фазі В ЛЕП і фаза С трансформатора – до фази С ЛЕП. Струми лівого і правого плечей живлення тягової підстанції позначені відповідно як $\dot{I}_{л}$ і $\dot{I}_{п}$, струм в лінії, що відсмоктує – $\dot{I}_{р}$. Напрямок протікання зазначених струмів прийняті, виходячи з того, що вторинна обмотка може розглядатися як своєрідний генератор, від якого струм протікає до тягового навантаження (електровозів). Поява струмів $\dot{I}_{л}$ і $\dot{I}_{п}$ призводить до протікання струмів в фазах вторинної ($\dot{I}_{a}$, $\dot{I}_{b}$, $\dot{I}_{c}$) та первинної ($\dot{I}_{A}$, $\dot{I}_{B}$,

$\dot{I}_C$) обмоток трансформатора і в фазах ЛЕП (рис. 2.1).

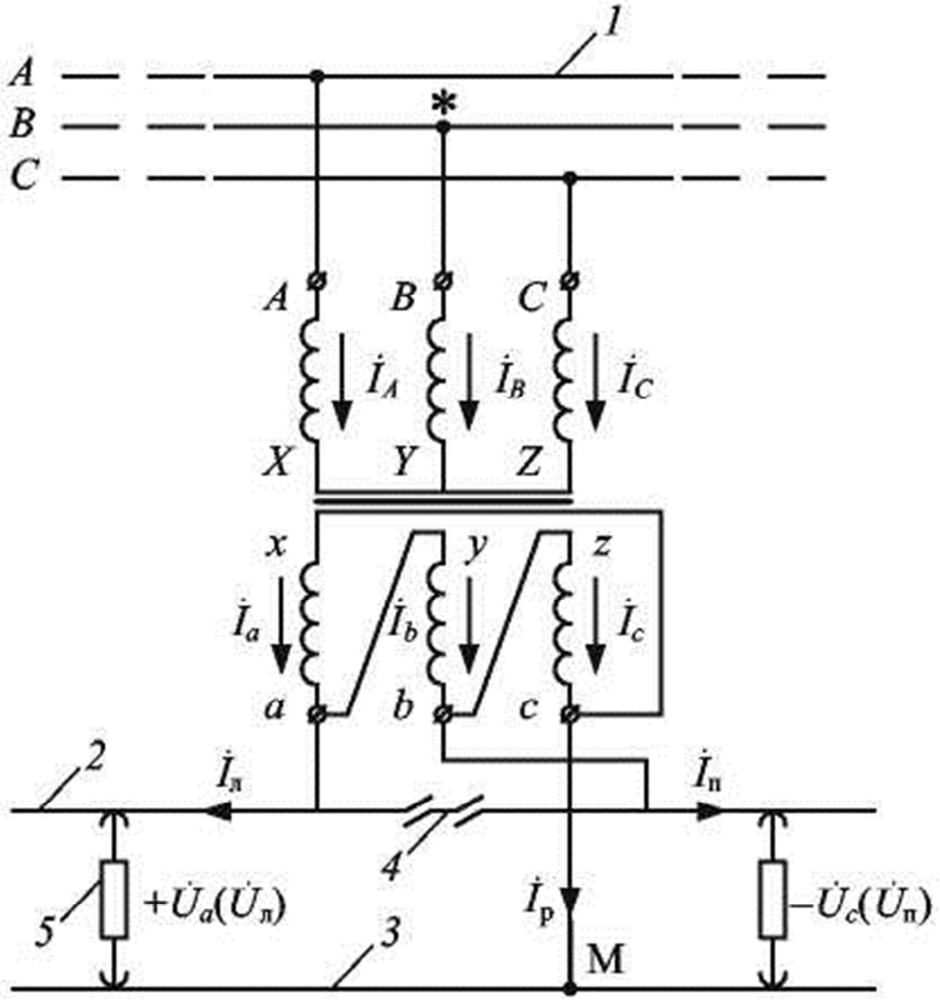


Рис. 2.1. Схема живлення тягової мережі однофазного струму за допомогою трифазного трансформатора зі схемою з'єднання обмоток Y/Δ–11:

1 – трифазна ЛЕП, *2* – контактна мережа, *3* – рейки, *4* – нейтральна вставка, *5* – електровоз

Векторна діаграма фазних і лінійних ЕРС для первинної та тягової обмоток трансформатора наведена на рис. 2.2. Вона побудована виходячи з того, що обидві обмотки намотані однаково (в одну сторону) і мають однакове маркування виводів. З діаграми видно, що зсув між однойменними векторами лінійних ЕРС первинної і тягової обмоток становить 330° (11×30°), тобто розглянутий трифазний трансформатор має одинадцяту групу з'єднання обмоток.

При розгляді роботи будь-якої тягової підстанції змінного струму з трифазними трансформаторами необхідно враховувати характерні особливості умов роботи тягових трифазних трансформаторів:

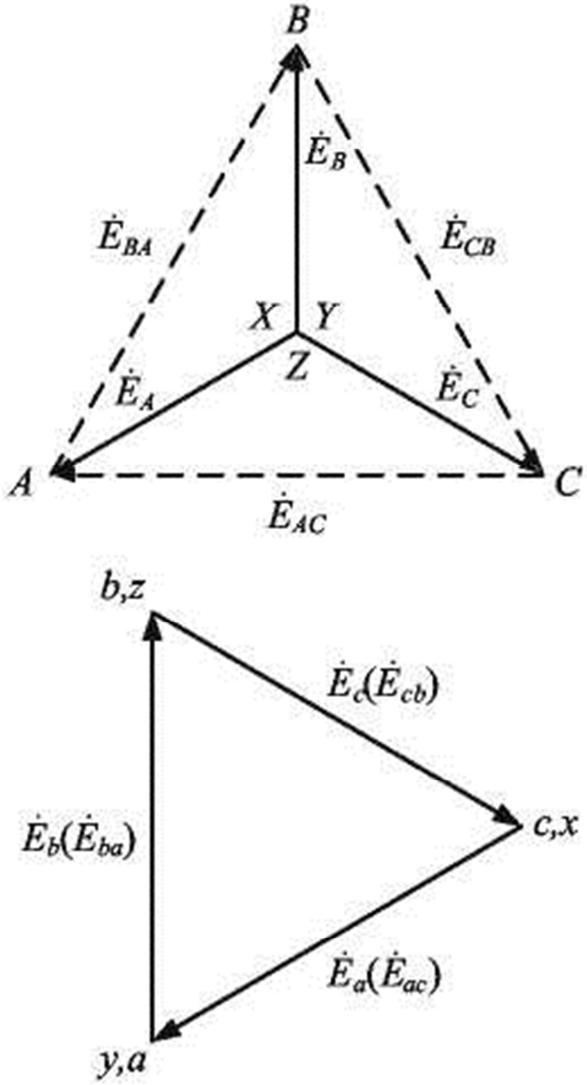


Рис. 2.2. Векторна діаграма фазних і лінійних ЕРС для первинної та тягової обмоток трансформатора

1. На всіх тягових підстанціях змінного струму до рейок на стороні 27,5 кВ завжди приєднується початок обмотки фази *c*, а не фаза *c*. Це не одне і те ж, так як від трифазного трансформатора живляться не три, а тільки два однофазних навантаження (в даному випадку електровози, що знаходяться ліворуч і праворуч від тягової підстанції).

2. На тягову мережу подаються напруги тільки двох фаз трансформатора (системи): для тягової підстанції (рис. 2.1) це напруга фази *a* (напруга лівого плеча живлення, позначена додатково як $\acute{U}_л$) і фази *c* (напруга правого плеча живлення, позначена додатково як $\acute{U}_п$). Для того щоб правильно визначити фазу, напруга якої подається на те чи інше плече живлення, необхідно подивитися,

початок і кінець обмотки якої фази приєднуються на дане плече живлення (до контактної мережі і рейок або до рейок і контактної мережі). Напруга третьої фази (для даної підстанції це фаза *b*) прикладена по кінцях нейтральної вставки (рис. 2.1).

Звертає на себе увагу той факт, що умови подачі напруги на плечі живлення дещо різняться. На ліве плече живлення напруга подається при приєднанні початку обмотки фази *a* до контактної мережі, а на правому плечі живлення до контактної мережі приєднується кінець обмотки фази *c*. Для того щоб розрізняти ці два випадки (при розгляді в подальшому цілого ряду завдань), вводиться чисто умовне правило: якщо на контактну мережу приєднується початок обмотки тієї фази, напруга якої подається на плече живлення, то це напруга на плечі живлення вказується зі знаком «+», при приєднанні до контактної мережі кінця обмотки фази, напруга якої подається на плече живлення, напруга вказується зі знаком «-» (рис. 2.1).

3. Від трифазного трансформатора живляться два однофазні навантаження (два плеча живлення). На тягову мережу подається напруга тільки двох фаз. Для даної підстанції (рис. 2.1) це фази *a* та *c*. Тому завантаження фаз трансформатора і відповідно ЛЕП (від цієї підстанції) виходить несиметричними. Струми в усіх трьох фазах, як правило, виходять різними, але одна з фаз виявляється явно недовантаженою. Такий фазою є та, напруга якої на тягову мережу не подається. Для даної підстанції це фаза *b*. Слід зауважити, що при застосуванні на тягових підстанціях трансформаторів з одинадцятої групою з'єднання обмоток і приєднання до рейок початку обмотки фази *c* менш навантаженої фазою трансформатора завжди буде фаза *b* по заводському маркуванні і відповідно та фаза ЛЕП, до якої вона приєднується (на рис. 2.1 фаза виділена значком *). Дану обставину надалі буде використано при складанні схеми живлення групи тягових підстанцій змінного струму від ЛЕП.

Струми плечей живлення тягової підстанції визначають величину струму її лінії, що відсмоктує $\dot{I}_{\text{р}}$. На підставі першого закону Кірхгофа для точки М (рис. 2.1) можна записати, що $\dot{I}_{\text{р}} = -(\dot{I}_{\text{л}} + \dot{I}_{\text{п}})$.

Векторна діаграма напруги і струмів для сторони 27,5 кВ трифазного трансформатора наведена на рис. 2.3.

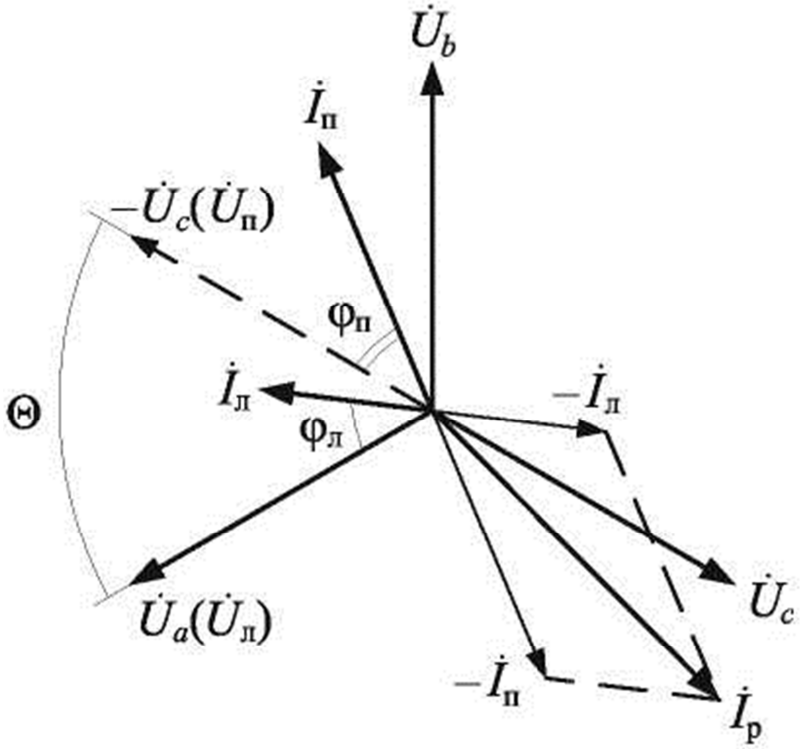


Рис. 2.3. Векторна діаграма напруги і струмів для сторони 27,5 кВ трифазного тягового трансформатора

На діаграмі наведені вектори фазних (лінійних) напруг тягової обмотки трансформатора і струмів плечей живлення щодо відповідних векторів напруги. Положення векторів струму $\dot{I}_л$ і $\dot{I}_п$ визначається активно-індуктивним характером тягового навантаження і величиною кутів $\varphi_л$ і $\varphi_п$. Значення даних кутів в робочому режимі складають 30-45°, в середньому приймаються рівними 37°. Для побудови вектору струму лінії, що відсмоктує $\dot{I}_р$ використовуємо вищенаведений вираз для даного струму. Для оцінки модуля цього струму, який, як правило, становить інтерес при проектуванні і експлуатації, може бути використано простий вираз, що отримується на основі теореми косинусів при розгляді трикутника зі сторонами, рівними $\dot{I}_л$ і $\dot{I}_п$.

При однакових значеннях кутів $\varphi_л$ і $\varphi_п$ маємо

$$I_{\text{р}}^2 = I_{\text{л}}^2 + I_{\text{п}}^2 - 2I_{\text{л}}I_{\text{п}}\cos 120^\circ. \qquad (2.1)$$

Отримуємо, що

$$I_{\text{р}} = \sqrt{I_{\text{л}}^2 + I_{\text{п}}^2 + I_{\text{л}}I_{\text{п}}}. \qquad (2.2)$$

Кут між векторами напруги плечей живлення θ для тягової підстанції з трифазним трансформатором дорівнює 60° (рис. 2.3).

Розглянемо характер розподілу струмів плечей живлення тягової підстанції між фазами трансформатора, що визначає потужність трансформаторів, які встановлюються на підстанції, а також режим напруги на її плечах. З цією метою для даної підстанції (рис. 2.1) побудуємо векторну діаграму напруги для тягової обмотки, поєднавши її з умовною схемою живлення навантажень плечей живлення підстанції, рис. 2.4.

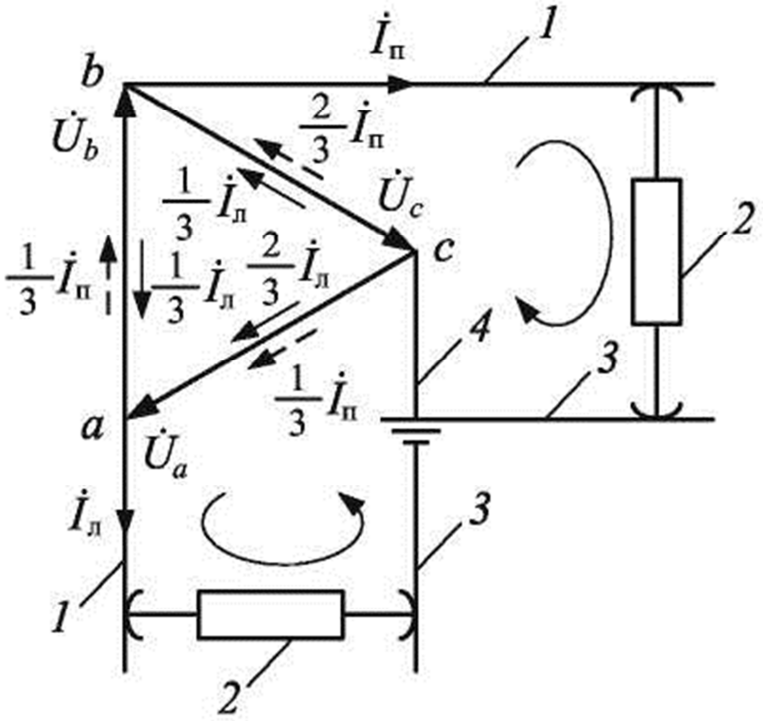


Рис. 2.4. Розподіл струмів плечей живлення підстанції між фазами трансформатора:

1 – контактна мережа, *2* – електровоз, *3* – рейки, *4* – лінія, що відсмоктує

Для схеми з'єднання обмоток Y/Δ (або Y/Y/Δ) кожну фазу трансформатора і при несиметричному навантаженні можна розглядати незалежно від інших. Тому розподіл навантажень на вторинній стороні між фазами трансформатора визначається тільки співвідношенням опорів обмоток. Покажемо, як розподіляється струм лівого плеча живлення підстанції між фазами тягової обмотки трансформатора. Напрямок протікання струму в контурі лівого плеча живлення (контактна мережа, електровоз, рейки, відсмоктуюча лінія підстанції, обмотки трансформатора) виділено стрілкою (рис. 2.4). Неважко бачити, що струм $\dot{I}_{\text{л}}$ в точці *c* ділиться між двома гілками: *ca* і *cba*. Опір першої з них в 2 рази менше, так як опори обмоток всіх трьох фаз однакові. З цього випливає, що розподіл струму $\dot{I}_{\text{л}}$ між зазначеними гілками відбуватиметься в співвідношенні 2:1, т. б. ⅔ струму $\dot{I}_{\text{л}}$ піде крізь гілку *ca* і ⅓ крізь гілку *cba*. Результуючий струм обмотки кожної фази в векторній формі записи можна знайти, підсумувавши всі струми, що припадають на ту чи іншу фазу. В кінцевому підсумку отримаємо такі вирази в векторній формі для струмів фаз, враховуючи відповідним знаком («+» або «-»), збігається чи ні напрямок вектору напруги тієї або іншої фази з напрямком струмів, що протікають по обмотці фази (рис. 2.4).

$$\begin{aligned}
\dot{I}_a &= \frac{2}{3}\dot{I}_{\text{л}} + \frac{1}{3}\dot{I}_{\text{п}} \\
\dot{I}_b &= \frac{1}{3}\dot{I}_{\text{п}} - \frac{1}{3}\dot{I}_{\text{л}} \\
\dot{I}_c &= -\frac{2}{3}\dot{I}_{\text{п}} - \frac{1}{3}\dot{I}_{\text{л}}
\end{aligned} \quad . \qquad (2.3)$$

Вирази (2.3) можна отримати і на основі рис. 2.1, застосовуючи перший закон Кірхгофа для виводів тягової обмотки *a* та *b* [3].

$$\begin{aligned}
\dot{I}_{\text{л}} &= \dot{I}_a - \dot{I}_b; \\
\dot{I}_{\text{п}} &= \dot{I}_b - \dot{I}_c.
\end{aligned} \qquad (2.4)$$

Врахуємо також, що

$$\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0. \qquad (2.5)$$

Вирішуючи систему рівнянь, що складається з виразів (2.4) і (2.5), відносно $\dot{I}_a$, $\dot{I}_b$ та $\dot{I}_c$, отримаємо рівняння (2.3).

Вирази (2.3) є універсальними, т. б. можуть бути застосовні для будь-якої тягової підстанції змінного струму при відомій схемі приєднання виводів первинної обмотки її трансформатора *A*, *B*, *C* до фаз ЛЕП і виводів тягової обмотки *a*, *b* до контактної мережі. Вирази (2.3) в наведеному вигляді справедливі для підстанції, зображеної на рис. 2.1. Для підстанцій, що підключаються до ЛЕП і до контактної мережі інакше, струми $\dot{I}_л$ і $\dot{I}_п$ можуть помінятися місцями так само, як і символи фаз струмів в лівій частині виразів, які будуть визначатися вже не заводський маркуванням виводів, а символом фази ЛЕП, до якої відбувається фактичне приєднання. На основі отриманих виразів для струмів $\dot{I}_a$, $\dot{I}_b$ та $\dot{I}_c$ можна сформулювати два правила, що дозволяють відразу написати вираз (2.3) для будь-якої схеми підключення тягової підстанції змінного струму до ЛЕП і до контактної мережі, не наводячи схему розподілу струмів плечей живлення (рис. 2.4) і не вирішуючи систему рівнянь, що складається з (2.4) і (2.5). Ці правила зводяться до наступного (при правильно визначених напругах, що подаються на плечі живлення):

1. На фазу трансформатора, напруга якої подається на дане плече живлення, припадає ⅔ струму цього плеча живлення (лівого або правого), а ⅓ струму плеча живлення протікає по двох інших фазах трансформатора.

2. Для фази, напруга якої подається на тягову мережу зі знаком «+», обидва доданки в правій частині виразу для струму беруться з таким же знаком. Якщо напруга має місце зі знаком «–», то обидва доданки у виразі для струму фази вказуються зі знаком «–».

Отримані вирази (2.3) визначають струми фаз трансформатора в векторній формі запису. Вони можуть бути використані для оцінки модулів струмів фаз, які, як правило, і становлять інтерес при проектуванні і експлуатації. Але для цього

попередньо необхідно побудувати векторну діаграму напруги і струмів для сторони 27,5 кВ (рис. 2.3), щоб визначити фази векторів струмів плечей живлення для даної підстанції. Знайти модулі струмів фаз трансформатора можна, і не будуючи зазначену векторну діаграму і не здійснюючи обчислень з комплексними числами.

Для визначення модулів струмів фаз тягової обмотки трансформатора підстанції, схема підключення якої наведена на рис. 2.1, побудуємо векторну діаграму напруги і струмів (рис. 2.5), використовуючи вираз (2.3).

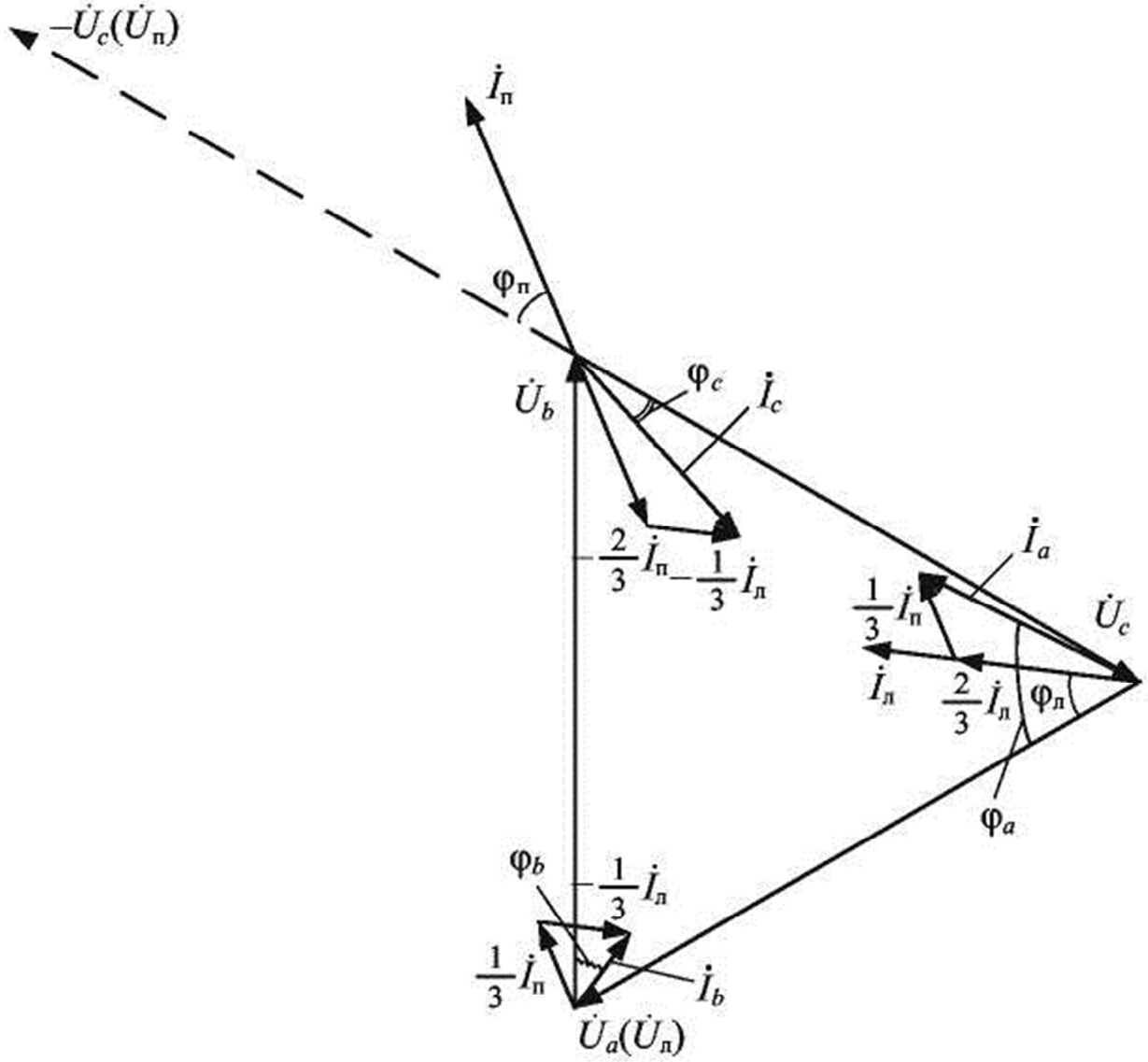


Рис. 2.5. Векторна діаграма для визначення модулів струмів фаз трансформатора

На діаграмі наведені вектори напруги фаз тягової обмотки трансформатора, сполученої в трикутник $\acute{U}_a$, $\acute{U}_b$, $\acute{U}_c$, та вектори струмів плечей

живлення $\dot{I}_л$ і $\dot{I}_п$, що відстають по фазі (кути $\varphi_л$ і $\varphi_п$) від відповідних векторів напруги. На основі виразу (2.3) побудовані вектори струмів фаз $\dot{I}_a$, $\dot{I}_b$ та $\dot{I}_c$. Як і варто було очікувати, модуль струму фази *b* виявився найменшим (рис. 2.1), а кути між векторами напруги та струму для трьох фаз (φ_a, φ_b і φ_c) вийшли неоднаковими. Це означає, що коефіцієнти потужності по фазах трансформатора і ЛЕП виходять різними, що призводить до різних втрат та рівнів напруги на плечах живлення підстанції навіть при однакових струмах на плечах.

Для визначення модуля струму $\dot{I}_a$ розглянемо трикутник з відомими сторонами $⅔\dot{I}_л$ і $⅓\dot{I}_п$ (рис. 2.5). На основі теореми косинусів можна записати

$$I_a^2 = \frac{4}{9} I_л^2 + \frac{1}{9} I_п^2 - 2\frac{2}{9} I_л I_п \cos(120^\circ + \varphi_л - \varphi_п). \qquad (2.6)$$

При $\varphi_л = \varphi_п$ матимемо

$$I_a = \frac{1}{3}\sqrt{4I_л^2 + I_п^2 + 2I_л I_п}. \qquad (2.7)$$

Розглядаючи відповідні трикутники для визначення струмів двох інших фаз I_b і I_c, аналогічним чином отримаємо

$$I_b = \frac{1}{3}\sqrt{I_л^2 + I_п^2 - I_л I_п}. \qquad (2.8)$$

$$I_c = \frac{1}{3}\sqrt{4I_п^2 + I_л^2 + 2I_л I_п}. \qquad (2.9)$$

Вирази (2.7)-(2.9) отримані для підстанції, схема приєднання якої до ЛЕП і до контактної мережі, наведена на рис. 2.1. Але вони можуть бути застосовані і для будь-якої іншої схеми приєднання підстанції до ЛЕП та контактної мережі. При цьому символи фаз струмів можуть помінятися місцями, а коефіцієнт «4» у

виразах (2.7) і (2.9) буде враховуватися з струмом іншого плеча живлення підстанції.

Для знаходження струмів фаз первинної обмотки трансформатора, що безпосередньо визначають завантаження фаз ЛЕП, необхідно врахувати коефіцієнт трансформації трансформаторів, встановлених на тяговій підстанції.

Група тягових підстанцій. При розгляді групи тягових підстанцій на ділянці виникають проблеми, пов'язані зі схемою приєднання їх трансформаторів до фаз ЛЕП. Якщо всі підстанції приєднувати до ЛЕП однаково, як, наприклад, приєднана до ЛЕП підстанція на рис. 2.1, то всі вони будуть недовантажувати одну і ту ж фазу ЛЕП (в розглянутому прикладі це фаза В). В результаті несиметрія струмів і обумовлена нею несиметрія напруги в ЛЕП будуть досить великі, що неприпустимо за умовами роботи генераторів електростанцій, що живлять ЛЕП (рис. 1.1), і трифазних асинхронних двигунів. Тому на електрифікованих ділянках змінного струму застосовують спеціальну схему підключення групи тягових підстанцій до ЛЕП, яка носить назву схема «зустрічного» або «подвійного» гвинта, рис. 2.6 [3].

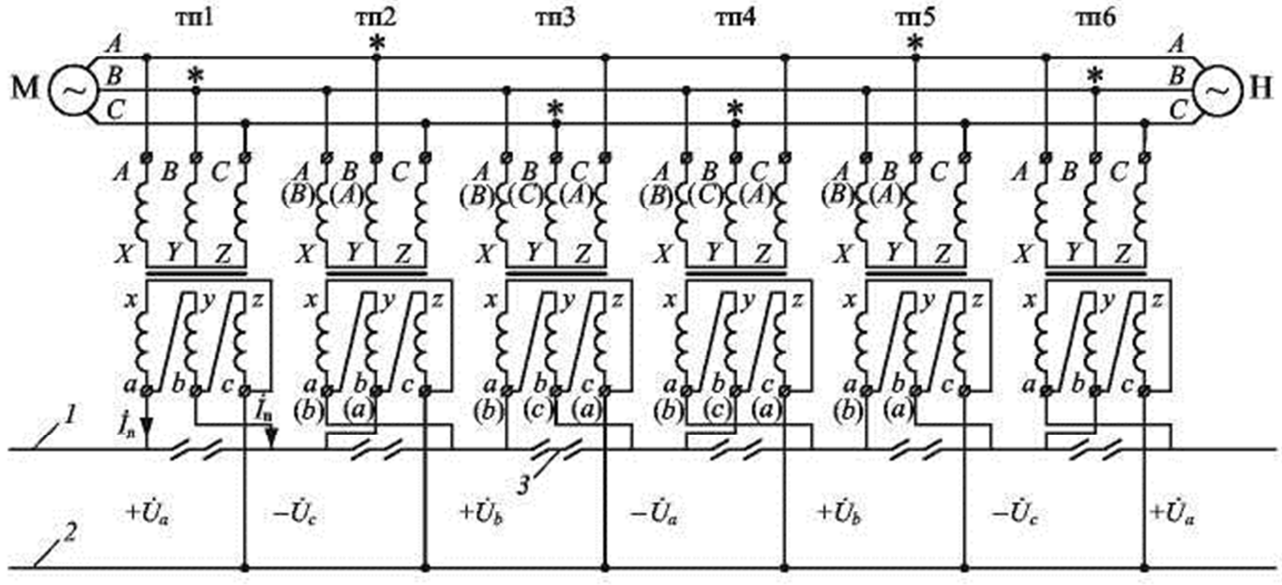


Рис. 2.6. Схема приєднання групи тягових підстанцій змінного струму з трифазними трансформаторами до ЛЕП та тягової мережі при двосторонньому живленні ЛЕП:

1 – контактна мережа, *2* – рейки, *3* – нейтральна вставка

Її призначення – зменшити несиметрію струмів в фазах ЛЕП, що живить електрифіковану ділянку, за рахунок чергування менш навантаженої фази ЛЕП від тягових підстанцій при переході від однієї підстанції до іншої.

Схема «зустрічного гвинта» для випадку двостороннього живлення ЛЕП від електростанцій М і Н наведена на рис. 2.6. На всіх тягових підстанціях встановлені трифазні трансформатори Y/Δ-11. Повний цикл даної схеми складається з шести підстанцій: на чотирьох підстанціях з шести (для варіанту, що розглядається це ТП2-ТП5) приєднання їх до ЛЕП здійснюється (частково або повністю) не у відповідності із заводським маркуванням виводів. Так, наприклад, на ТП2 фаза А трансформатора приєднується до фази В ЛЕП, а фаза В – до фази А ЛЕП. Послідовність складання схеми «зустрічного» гвинта досить проста і зводиться до виконання наступних етапів:

1. На всіх шести тягових підстанціях до рейок приєднується початок обмотки фази *с*.

2. Приєднання ТП1 до ЛЕП та тягової мережі здійснюється довільно або відповідно до завдання. Нехай вона буде приєднана відповідно до рис. 2.1. Потім необхідно визначити, напруги яких фаз подаються на плечі живлення і яка фаза ЛЕП буде менш навантаженою від ТП1. На даній підстанції на плечі живлення подаються напруги $+\dot{U}_a$ та $-\dot{U}_c$, а менш навантаженої фазою ЛЕП від неї є фаза *В*, що умовно позначено значком *.

3. Приєднання ТП2 до ЛЕП та тягової мережі має бути здійснене з дотриманням двох умов: перше – менш навантажена фаза ЛЕП від ТП2 повинна бути відмінною від аналогічної фази для ТП1, і друге – для забезпечення двостороннього живлення контактної мережі між ТП1 і ТП2 (на першій між підстанційній зоні) на ліве плече живлення ТП2 має бути подана точно така ж напруга (по символу А, В або С і знаку), як і на праве плече живлення ТП1.

Приєднання ТП2 до ЛЕП починається з однієї з фаз первинної обмотки трансформатора. Такий фазою для будь-якої підстанції буде фаза *В* трансформатора (по заводському маркуванні), що є завжди (при підключенні до рейки початку обмотки фази *с*), як відмічалося раніше, менш навантаженої. Фаза

ЛЕП, до якої вона приєднується, виявляється недовантаженою від даної підстанції. Такий фазою ЛЕП для ТП1 була фаза *B*, тому фазу *B* трансформатора треба приєднати до фази *A* або *C* ЛЕП. Якщо приєднаємо до фази *C*, то в цьому випадку на першу міжпідстанційну зону від ТП2 неможна буде подати для забезпечення двостороннього живлення контактної мережі напругу фази *C*, так як напруга менш навантаженої фази трансформатора, як ми вже знаємо, на тягову мережу не подається. Таким чином, залишається фазу *B* трансформатора приєднати тільки до фази *A* ЛЕП. Вона і буде менш навантаженою від ТП2, що відзначено на рис. 2.6 відповідним значком *. Тому необхідно перемаркувати вивід *B* трансформатора в *A* відповідно до фази *A* ЛЕП, до якої він підключається. Це відображено в дужках на рис. 2.6.

Потім вирішуються питання, пов'язані з приєднанням фідерів контактної мережі, що йдуть від виводів *a* і *b* тягової обмотки трансформатора на плечі живлення. Один з цих виводів треба приєднати на ліве плече живлення ТП2, щоб забезпечити двостороннє живлення контактної мережі на першій міжпідстанційній зоні. Щоб правильно вибрати один з двох зазначених виводів трансформатора, необхідно подивитися, з яким знаком напруга подається на праве плече живлення ТП1 (рис. 2.6). Воно подається зі знаком «–», що означає підключення до контактної мережі кінця обмотки відповідної фази. При приєднанні до рейок кінця обмотки фази *c* трифазного трансформатора Y/Δ-11 на контактну мережу напруга зі знаком «–» завжди подається з виводу *b* трансформатора, а зі знаком «+» з виводу *a* (за заводським маркуванням). Тому на ліве плече живлення ТП2 треба підключити фідер, що йде з виводу *b*. Фідер, що йде від виводу *a*, приєднується до правого плеча живлення. Підключення ТП2 завершується приєднанням двох поки що не підключених виводів первинної обмотки *A* і *C* (за заводським маркуванням) до ЛЕП. Їх необхідно підключити такім чином, щоб на ліве плече живлення ТП2, була подана напруга фази *c*. Це досягається приєднанням виводу *C* трансформатора на фазу *C* ЛЕП, вивід *A* приєднується на фазу *B* ЛЕП. Відбувається перемаркування цього виводу на *B* (рис. 2.6). В результаті на праве плече живлення ТП2 подається напруга $+U_b$.

Приєднання ТП2 до ЛЕП та тягової мережі завершено. В ході підключення даної підстанції сталося перемаркування двох виводів трансформатора. З теорії роботи трансформаторів відомо, що в цьому випадку група з'єднання обмоток змінюється на зворотну [4]. Таким чином, після приєднання ТП2 до ЛЕП трифазний трансформатор на ній став мати першу групу з'єднання обмоток.

4. Здійснюється приєднання до ЛЕП і до контактної мережі ТП3 в тій же послідовності, що і ТП2. При визначенні, до якої фазі ЛЕП треба підключити фазу *B* трансформатора (за заводським маркуванням) як менш завантажену, виходять з того, що вона повинна бути відмінна від аналогічної фази для ТП1 і ТП2. Такою фазою є фаза *C* ЛЕП (рис. 2.6). В процесі підключення ТП3 відбувається перемаркування всіх трьох виводів трансформатора. Це означає, що група з'єднання обмоток трансформатора залишається попередньою, Y/Δ-11 [4].

5. Проводиться підключення до ЛЕП інших тягових підстанцій ділянки: ТП4 підключається точно так же, як ТП3, ТП5 – як ТП2 і ТП6 – як ТП1. Звідси і назва схеми підключення – схема «зустрічного» або «подвійного гвинта». До тягової мережі ТП4, ТП5, ТП6 підключаються так, щоб було забезпечено двостороннє живлення контактної мережі (рис. 2.6).

Переваги даної схеми: практично почергове завантаження фаз системи тягової мережі і чергування менш навантаженої фази системи при переході від однієї підстанції до іншої (рис. 2.6), використання на підстанціях однотипних трифазних трансформаторів зі схемою з'єднання обмоток Y/Δ-11, що випускаються промисловістю, конструктивна однотипність РП-27,5 кВ, так як на рейки на всіх тягових підстанціях приєднується початок обмотки фази *c* (за заводським маркуванням).

Покажемо, що застосування схеми «зустрічного гвинта» дозволяє відчутно зменшити несиметрію струмів в фазах ЛЕП, обумовлену навантаженням тягових підстанцій, особливо на її головних ділянках, ділянках ЛЕП, прилеглих до електричних станцій. Поставлену задачу для спрощення доказу розглянемо з урахуванням деяких припущень:

– відстані між тяговими підстанціями і від крайніх підстанцій до джерел

живлення М і Н однакові (рис. 2.6);

– струми плечей живлення тягової підстанції однакові, $I_л = I_п$;

– струми лівих і правих плечей живлення всіх тягових підстанцій рівні.

Попередньо побудуємо векторну діаграму напруги, струмів прямої і зворотної послідовності і струмів фаз для первинної обмотки трансформатора ТП1 і ТП2 (рис. 2.6). При побудові зазначеної діаграми виходимо з того, що будь-яка трифазна несиметрична система струмів в найзагальнішому випадку може бути представлена як сума трьох симетричних складових: прямої, зворотної і нульової послідовностей. Їх геометрична сума визначає вектор струму кожної фази. У зв'язку з тим, що відбір потужності для живлення тягового однофазного навантаження здійснюється між двома фазами, а не між фазою і нульовим проводом, складова нульової послідовності для даної задачі відсутня. Для цього випадку на рис. 2.7 наведені векторні діаграми симетричних складових струму прямої і зворотної послідовностей і векторна діаграма струмів при несиметричному завантаженні фаз.

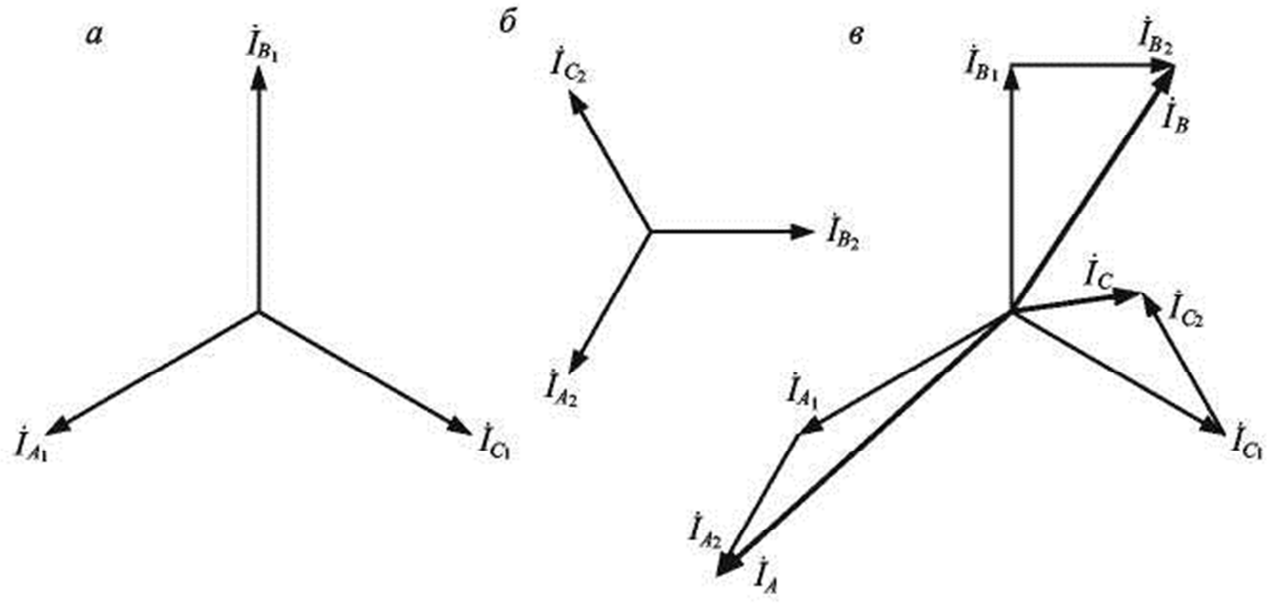


Рис. 2.7. Векторні діаграми симетричних складових струмів фаз:

а – пряма послідовність, *б* – зворотна послідовність, *в* – при несиметричному завантаженні фаз

Векторна діаграма струмів при несиметричному завантаженні фаз виходить додаванням симетричних складових прямої і зворотної послідовності

для кожної фази. Взаємне розташування векторів струму прямої і зворотної послідовностей може бути найрізноманітнішим.

Розглянемо ТП1 на рис. 2.6. Для неї струми первинної обмотки трансформатора $I_A = I_C$ (див. (2.7) і (2.9)), а струм I_B буде істотно менше, ніж I_A (I_C) з урахуванням раніше прийнятого допущення, що $\dot{I}_л = \dot{I}_п$. Такому співвідношенню струмів фаз відповідає строго певна взаємна орієнтація векторів струму прямої і зворотної послідовностей менш навантаженої фази. Дані вектори струмів повинні знаходитися в протифазі, рис. 2.8. Використовуючи положення про те, що вектори струмів прямої і зворотної послідовностей менш навантаженої фази трансформатора при рівних навантаженнях плечей живлення підстанції перебувають в протифазі, побудуємо векторні діаграми напруги, струмів прямої і зворотної послідовностей і струмів фаз для первинної обмотки трансформатора першої і другої тягових підстанцій (рис. 2.6).

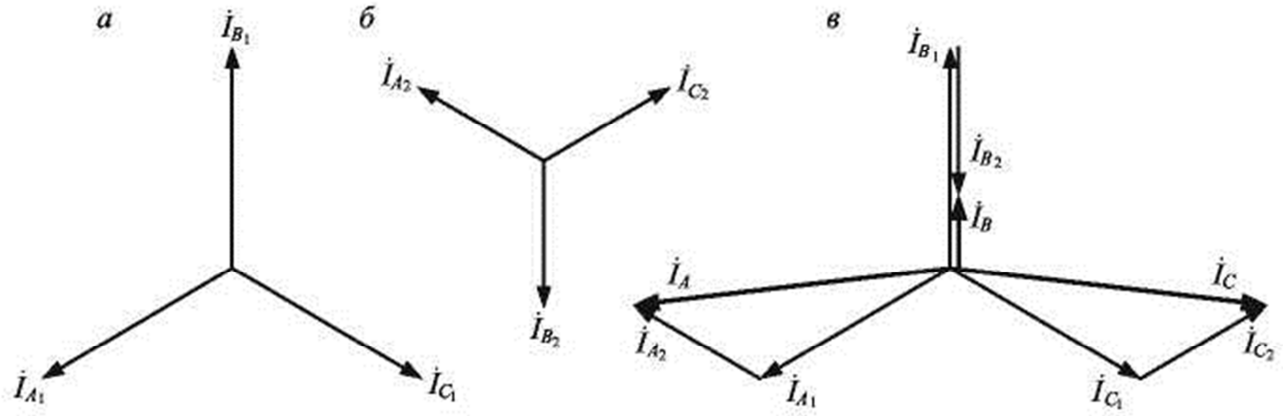


Рис. 2.8. Векторні діаграми симетричних складових і струмів фаз, обумовлених в ЛЕП ТП1, при рівних навантаженнях її плечей живлення:

а – пряма послідовність, *б* – зворотна послідовність, *в* – струми фаз

Для даних підстанцій вектори струмів прямої послідовності $\dot{I}_{A1}$, $\dot{I}_{B1}$, $\dot{I}_{C1}$ щодо відповідних векторів напруги фаз побудовані з урахуванням активно-індуктивного характеру тягового навантаження, рис. 2.9. Зсув між напругою і струмом був прийнятий приблизно 30°. Для першої підстанції менш навантаженої фазою є фаза *B* (рис. 2.6), тому вектор струму зворотної послідовності для даної фази $\dot{I}_{B2}$ йде в протифазі вектору струму прямої послідовності $\dot{I}_{B1}$. Для другої підстанції такої фазою є фаза *A*. Вектори струмів фаз $\dot{I}_A$, $\dot{I}_B$, $\dot{I}_C$ були побудовані

підсумовуванням векторів струму прямої і зворотної послідовностей відповідних фаз.

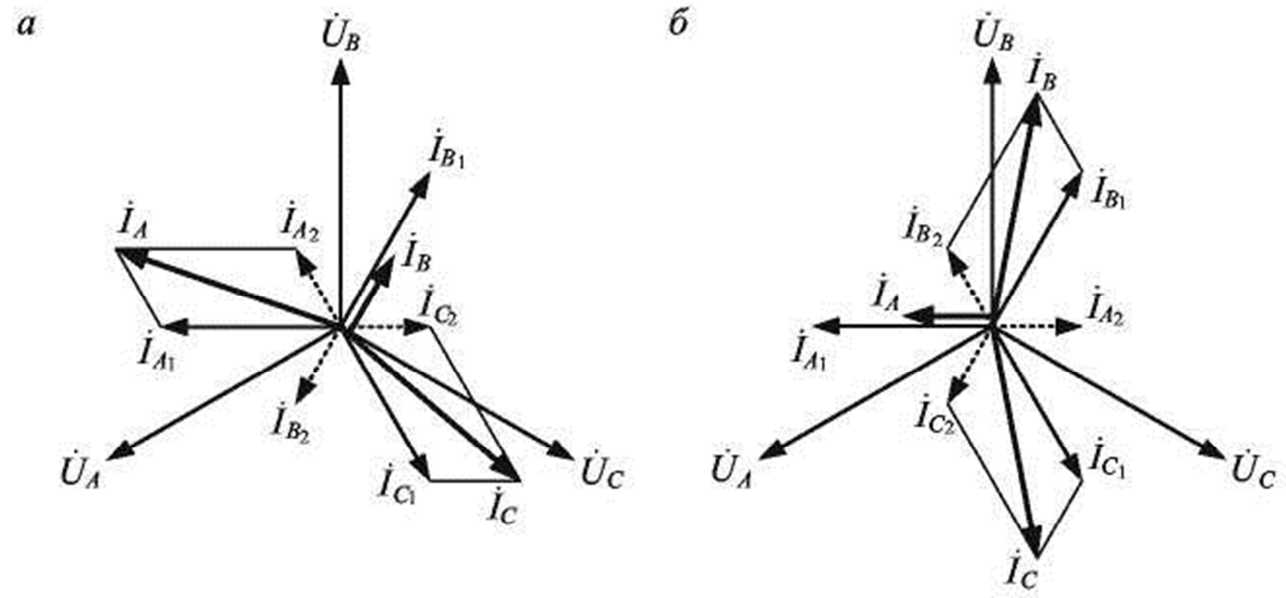


Рис. 2.9. Векторні діаграми струмів прямої і зворотної послідовностей і струмів фаз для первинної обмотки трансформатора:

а – для першої тягової підстанції; *б* – для другої тягової підстанції

При порівнянні векторних діаграм, наведених на рис. 2.9, а і б, видно, що при переході від ТП1 до ТП2 вектори струмів зворотній послідовності змінюють свою фазу, повертаючись на 120° за годинниковою стрілкою. Це ж буде мати місце і при переході від ТП2 до ТП3. Використовуючи дану обставину, наведемо умовну схему завантаження однієї фази ЛЕП струмами зворотної послідовності від шести тягових підстанцій, приєднаних за схемою «зустрічного гвинта» (рис. 2.6). При прийнятих раніше допущених струм I_2 для всіх підстанцій буде один і той же. З урахуванням того, що відстань між підстанціями і від крайніх підстанцій до джерел живлення М і Н прийняті рівними, умовна схема буде мати вигляд, наведений на рис. 2.10.

На рис. 2.10 показано взаємне розташування вектору струму $\dot{I}_2$ для ТП1, ТП2 і ТП3. Розташування вектору цього струму для ТП4, ТП5 і ТП6 визначається умовами: ТП4 підключається до ЛЕП, як ТП3, ТП5 – як ТП2 і ТП6 – як ТП1. Струм $\dot{I}_2$ кожної підстанції розподіляється між джерелами живлення (електростанціями) М і Н обернено пропорційно відстаням до цих джерел.

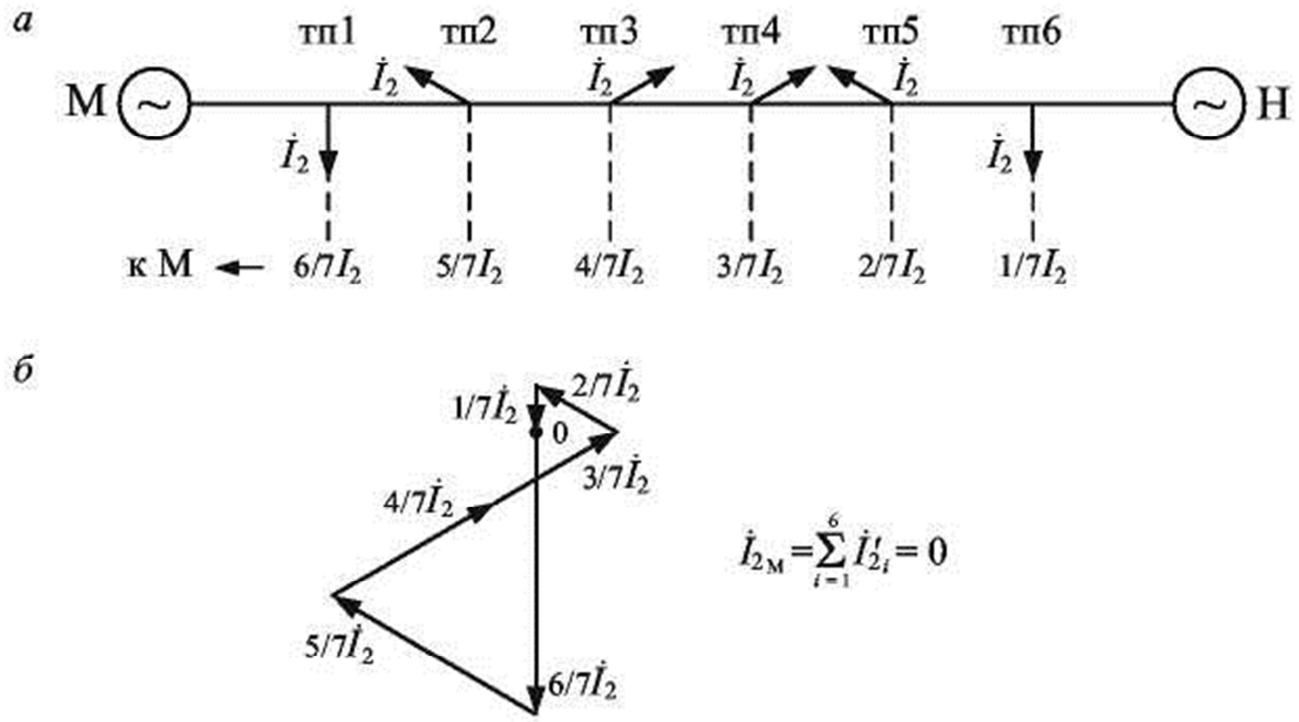


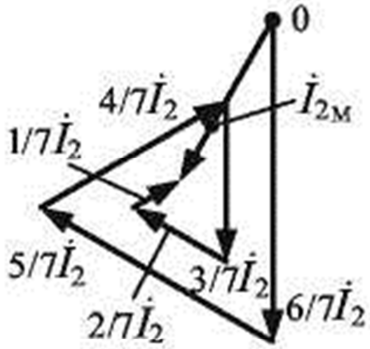
Рис. 2.10. Визначення струму зворотної послідовності на головній ділянці ЛЕП при схемі «зустрічного гвинта»:

а – умовна схема завантаження однієї фази ЛЕП струмами зворотної послідовності; *б* – оцінка струму зворотної послідовності

Яка частина струму I_2 від кожної підстанції доводиться на джерело М, зазначено на рис. 2.10, *а* нижче умовної схеми завантаження фази ЛЕП. Для визначення струму зворотної послідовності на ділянці між джерелом живлення М і першою підстанцією $\dot{I}_{2\text{М}}$ підсумуємо всі складові струму *С* (в загальному випадку позначимо їх як $\dot{I}'_2$), що припадають від всіх шести тягових підстанцій на джерело живлення М. Виконана побудова (рис. 2.10, *б*, точка О – початок побудови) показала, що на даній ділянці струм зворотної послідовності дорівнює нулю. Це означає, що навантаження фаз ЛЕП на ділянці, що прилягає до електростанції, буде симетричною і ніякого негативного впливу на роботу її генераторів струми зворотної послідовності, обумовлені роботою тягових підстанцій, створювати не будуть.

Напрошувалася, на перший погляд, і більш краща схема приєднання тягових підстанцій, ніж схема «зустрічного гвинта», при якій забезпечувалася би почергове завантаження фаз системи по тягової мережі і чергування менш

навантаженої фази при переході від однієї підстанції до іншої. При такій схемі приєднання підстанцій до ЛЕП ТП4 підключалася би до неї, так як ТП1, ТП5 – як ТП2 і ТП6 – як ТП3 (рис. 2.6). Але тоді струм зворотної послідовності на ділянці між ТП1 і джерелом живлення М $\dot{I}_{2М}$ буде відмінний від нуля, рис. 2.11.



$$\dot{I}_{2М} = \sum_{i=1}^{6} \dot{I}'_{2i} = 0{,}5\dot{I}_2$$

Рис. 2.11. Визначення струму зворотної послідовності на головній ділянці ЛЕП при схемі приєднання підстанцій до ЛЕП, відмінної від схеми «зустрічного гвинта»

Виконана побудова показує, що струм $\dot{I}_{2М}$ буде дорівнює $0{,}5\dot{I}_2$.

В умовах експлуатації і при схемі «зустрічного гвинта» на ділянках між крайніми тяговими підстанціями і джерелами живлення струм зворотної послідовності буде відмінний від нуля, так як відстані між тяговими підстанціями різні, їх навантаження неоднакові, струми плечей живлення підстанції різні. Схема «зустрічного гвинта» відчутно зменшує несиметрію струмів в фазах ЛЕП, на одних ділянках більше, на інших – менше. Якщо ж вона і після цього залишається істотна, то застосовують додаткові заходи щодо її зниження.

2.2 Тягові підстанції з однофазними трансформаторами, з'єднаними за схемою відкритого трикутника

Схема відкритого трикутника складається з двох однакових однофазних трансформаторів. На первинній і вторинній стороні початки обмоток одного трансформатора з'єднується з кінцем обмотки іншого. На вторинній стороні (на

стороні 27,5 кВ) загальна точка для обох трансформаторів приєднується до рейок, а два виводи, що залишилися – на контактну мережу, рис. 2.12.

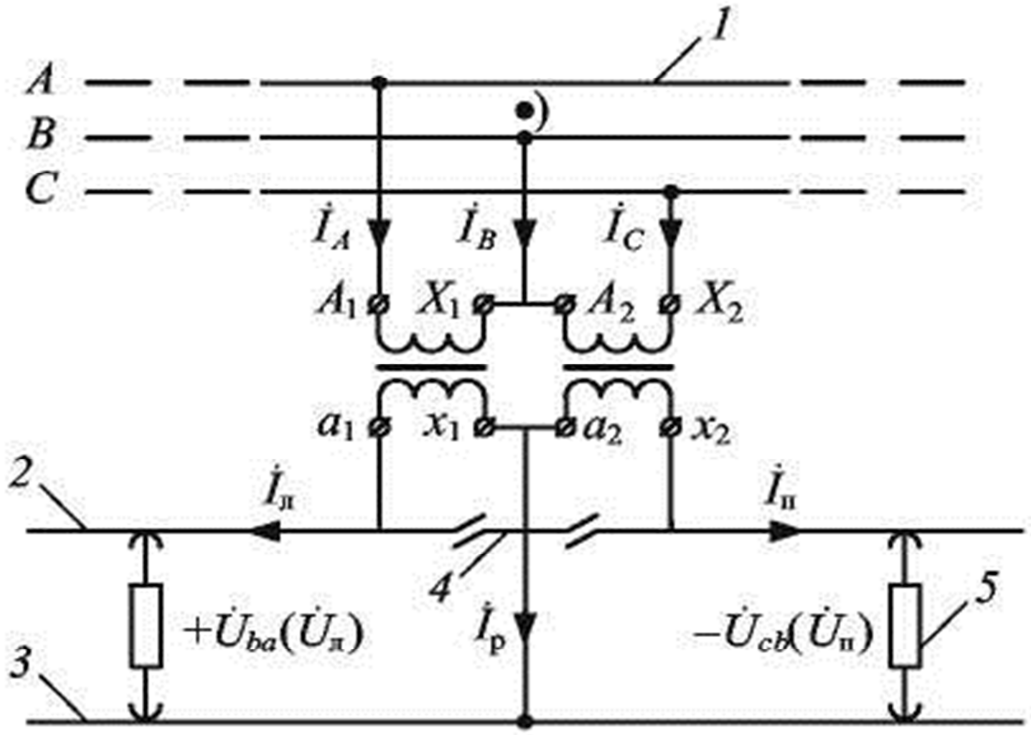


Рис. 2.12. Схема живлення тягової мережі однофазного струму при застосуванні на тяговій підстанції схеми відкритого трикутника:

1 – трифазна ЛЕП, *2* – контактна мережа, *3* – рейки; *4* – нейтральна вставка, *5* – електровоз.

Одиночна тягова підстанція. Схема приєднання тягової підстанції до зовнішньої і тягової мереж наведена на рис. 2.12.

На цьому малюнку $\dot{I}_л$ і $\dot{I}_п$ – струми лівого і правого плечей живлення підстанції, $\dot{I}_р$ – струм лінії підстанції, що відсмоктує.

При розгляді будь-якої тягової підстанції змінного струму зі схемою відкритого трикутника необхідно враховувати особливості умов її роботи. Вони зводяться до двох моментів:

– на відміну від тягових підстанцій з трифазним трансформатором Y/Δ-11, коли на тягову мережу подається напруга певної фази системи, при схемі відкритого трикутника на тягову мережу (на плечі живлення) подається лінійна напруга ЛЕП. Лінійні напруги позначені так само, як і при розгляді на тяговій підстанції трифазних трансформаторів: U_{ac}, U_{ba}, U_{cb} (рис. 2.2 і 2.4). Як і у випадку

з трифазним трансформатором, якщо до контактної мережі приєднується початок обмотки, напруга якої подається на тягову мережу, то воно вказується умовно зі знаком «+», в іншому випадку ставиться знак «-» (рис. 2.12);

– завантаження фаз ЛЕП також не симетричне, але на відміну від підстанцій з трифазним трансформатором виділяють не менше завантажену фазу трансформатора (і відповідно ЛЕП), а більш завантажену фазу ЛЕП, що є спільною для первинних обмоток однофазних трансформаторів. Символ цієї фази фігурує в позначенні напруги, що подаються на плечі живлення. Для даної підстанції – це фаза *B* (рис. 2.12), виділена значком •).

Струм лінії тягової підстанції, що відсмоктує $\dot{I}_{\text{р}}$, як і для підстанцій з трифазним трансформатором, дорівнює – ($\dot{I}_{\text{л}} + \dot{I}_{\text{п}}$). Векторна діаграма напруги і струмів для сторони 27,5 кВ наведена на рис. 2.13.

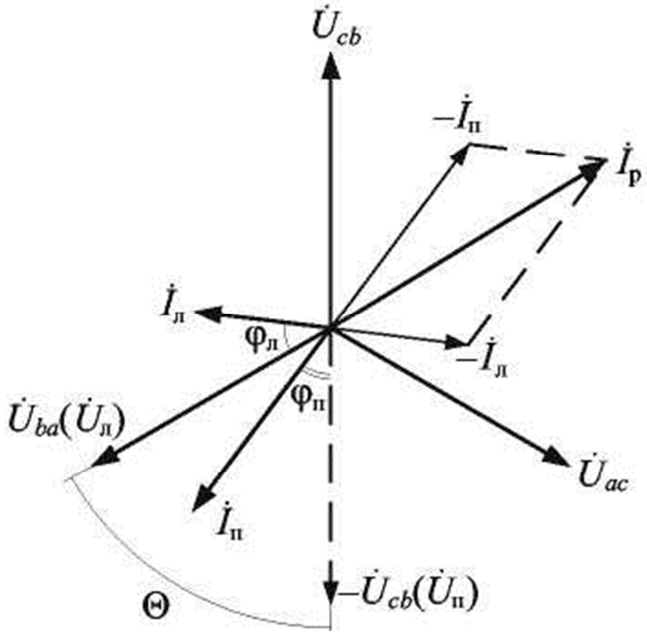


Рис. 2.13. Векторна діаграма напруги і струмів для сторони 27,5 кВ при схемі відкритого трикутника

На діаграмі зображені вектори лінійних напруг $\acute{U}_{ba}$, $\acute{U}_{cb}$, $\acute{U}_{ac}$ з виділенням лінійних напруг, що подаються на плечі живлення, які додатково позначені як $\acute{U}_{\text{л}}$ і $\acute{U}_{\text{п}}$ (рис. 2.12). Вектори струмів плечей живлення $\dot{I}_{\text{л}}$ і $\dot{I}_{\text{п}}$ побудовані щодо відповідних векторів напруги на основі тих же міркувань, що і для схеми живлення з трифазним трансформатором. Положення вектору струму лінії, що

відсмоктує $\dot{I}_р$ визначається вище наведеним виразом для даного струму, а модуль його – формулою (2.2). З векторної діаграми видно, що кут зсуву між напругою, що подається на плечі живлення тягової підстанції θ, як і при схемі живлення з трифазним трансформатором, дорівнює 60° (рис. 2.13).

Струми в фазах ЛЕП, обумовлені струмами плечей живлення, для розглянутої підстанції дорівнюють (рис. 2.12)

$$I_A = I_л/k_т,\ I_C = I_п/k_т,\ I_B = I_р/k_т, \qquad (2.10)$$

де $k_т$ – коефіцієнт трансформації однофазного трансформатора.

Застосування схеми відкритого трикутника на тягових підстанціях має свої переваги і недоліки в порівнянні з використанням трифазних трансформаторів. До переваг можна віднести:

– більш ефективне використання потужності трансформатора, так як трансформатор працює тільки на своє плече живлення. Трифазний трансформатор живить обидва плеча підстанції, струми фаз трансформатора різні, одна з фаз явно недовантажена. Потужність же трифазного трансформатора розраховується за струмом найбільш навантаженої фази;

– можливість незалежного регулювання напруги по плечах живлення підстанції, так як напруга на плечі живлення визначається струмом тільки даного плеча. При трифазних трансформаторах напруга на будь-якому плечі живлення залежить від струмів обох плечей, регулювання напруги за рахунок зміни коефіцієнта трансформації здійснюється одночасно за всіма трьома фазами трансформатора.

Недоліки схеми відкритого трикутника:

– необхідність установки на кожній тяговій підстанції трьох однофазних трансформаторів, один з яких постійно знаходиться в резерві на випадок виходу з роботи одного з двох працюючих трансформаторів. При застосуванні трифазних трансформаторів їх, як правило, на підстанції встановлюється два. У разі виходу з роботи одного з них навантаження повністю тимчасово переходить на інший;

– певні труднощі із забезпеченням живлення нетягового навантаження. Для його живлення встановлюється додатково трифазний трансформатор. На підстанціях з трифазним трансформатором для живлення нетягового навантаження, як правило, використовується третя обмотка тягового трансформатора.

Група тягових підстанцій. При застосуванні на тягових підстанціях змінного струму схеми відкритого трикутника і однаковому їх приєднання до ЛЕП несиметрія струмів в ній буде так само велика, як і при використанні на підстанціях трифазних трансформаторів. Тому для зменшення несиметрії струмів у зовнішній частині системи електропостачання тягової підстанції з однофазними трансформаторами, з'єднаними за схемою відкритого трикутника, приєднують до ЛЕП теж за схемою «зустрічного гвинта», рис. 2.14. Послідовність її складання та ж, що і для підстанцій з трифазними трансформаторами, але є і деякі особливості:

1. На шести тягових підстанціях, що становлять закінчений цикл схеми «зустрічного гвинта», первинні обмотки однофазних трансформаторів між собою з'єднуються, як правило, однаково. Зокрема, на рис. 2.14 показано, що на всіх підстанціях кінець обмотки першого трансформатора X_1 з'єднується з початком обмотки другого A_2.

2. Перша тягова підстанція до ЛЕП та тягової мережі приєднується довільно або за завданням. Нехай її приєднання буде виконано, як на рис. 2.12. Потім визначаються напруги, що подаються на плечі живлення підстанції (це $+\dot{U}_{ba}$ і $-\dot{U}_{cb}$ відповідно для лівого і правого плеча живлення), і більш завантажена фаза ЛЕП від ТП1 (це фаза *B*).

3. Приєднання ТП2 до ЛЕП та тягової мережі здійснюється з дотриманням двох умов: перше – більш навантажена фаза ЛЕП від ТП2 повинна відрізнятися від аналогічної фази для ТП1; друге – для забезпечення двостороннього живлення контактної мережі між ТП1 і ТП2 на ліве плече ТП2 має бути подано точно така ж напруга (по позначенню – *ba*, *cb* або *ac*, знаку і способу реалізації лінійної напруги з точки зору приєднання початку або кінця обмотки до відповідної фазі ЛЕП), як і на праве плече живлення ТП1.

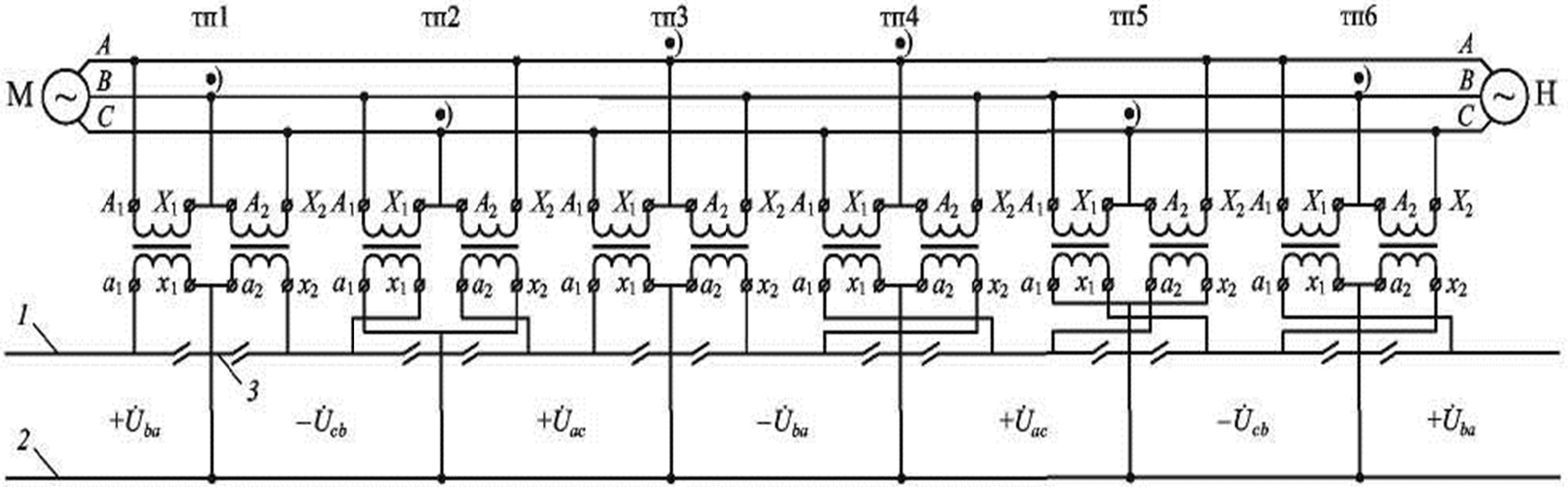


Рис. 2.14. Схема приєднання групи тягових підстанцій змінного струму при використанні на них схеми відкритого трикутника до ЛЕП і тягової мережі при двосторонньому живлені ЛЕП:

1 – контактна мережа; *2* – рейки; *3* – нейтральна вставка

Приєднання ТП2 до ЛЕП починається з визначення її фази, до якої повинна бути підключена загальна точка однофазних трансформаторів X_1 A_2 (рис. 2.12). Ця фаза буде більш завантаженою. Вона повинна бути відмінною від аналогічної фази для ТП1, фази *B*. Такою фазою ЛЕП може бути або фаза *A*, або *C*. Щоб визначитися з вибором, треба подивитися, символ який з цих фаз має місце в позначенні лінійної напруги, що подається на праве плече ТП1. Неважко бачити, що це символ фази *C*. Раніше при розгляді одиночної тягової підстанції було відзначено, що символ більш навантаженої фази фігурує в позначенні лінійних напруг, що подаються на плечі живлення підстанцій. Таким чином, загальна точка однофазних трансформаторів на первинній стороні повинна бути приєднана до фази *C* ЛЕП, яка і буде більш навантаженою від ТП2. Потім здійснюється приєднання одного з виводів вторинних обмоток трансформаторів до контактної мережі лівого плеча ТП2. Щоб визначити цей вивід, необхідно подивитися, за яких умов подається напруга на праве плече живлення ТП1. Видно, що на правому плечі ТП1 до контактної мережі приєднується живляча лінія, що йде від кінця обмотки (в даному випадку x_2, рис. 2.14). Вивід X_2 приєднується до фази *C* ЛЕП, тому що на ТП2 живляча лінія лівого плеча живлення повинна йти від кінця обмотки одного з трансформаторів (x_1 або x_2). Кінець обмотки на первинній стороні, як і на ТП1, повинен приєднуватися до фази *C* ЛЕП. Таким виводом після вже виконаного приєднання загальної точки трансформаторів на первинній стороні до фази *C* ЛЕП, є вивід x_1 (рис. 2.14), він і підключається на контактну мережу лівого плеча. Після його приєднання загальною точкою обмоток на вторинній стороні автоматично стає a_1x_2, яка приєднується на рейки, а вивід a_2 йде на контактну мережу правого плеча живлення ТП2.

Підключення ТП2 закінчується приєднанням виводів A_1 і X_2 трансформаторів до ЛЕП. Воно повинно бути виконано так, щоб з вторинної обмотки першого трансформатора, який вже визначений як трансформатор, що живить ліве плече підстанції, було подано напругу $\acute{U}_{cb}$ (рис. 2.14). Це буде мати місце, якщо вивід A_1 приєднується на фазу *B* ЛЕП, а вивід X_2 на фазу *A*. На праве

плече живлення буде подаватися напруга $+\acute{U}_{ac}$.

4. Приєднання ТП3 до ЛЕП та тягової мережі проводиться в тій же послідовності, що і ТП2 з виконанням умови, що більш навантаженою фазою ЛЕП від цієї підстанції буде фаза, відмінна від аналогічних фаз для ТП1 і ТП2.

5. Завершується складання схеми «зустрічного гвинта» приєднанням ТП4, ТП5 і ТП6. До ЛЕП ТП4 підключається, як ТП3, ТП5 – як ТП2 і ТП6 – як ТП 1. До тягової мережі зазначені підстанції повинні приєднуватися так, щоб забезпечити двостороннє живлення контактної мережі (рис. 2.14).

2.3 Тягові підстанції з однофазними трансформаторами, з'єднаними за схемою Скотта

Схема Скотта складається з двох однофазних трансформаторів. При використанні її на тягових підстанціях для забезпечення тяги поїздів первинна обмотка одного з них підключається до двох будь-яких фаз ЛЕП, а первинна обмотка іншого своїм початком приєднується до середньої точки первинної обмотки першого трансформатора (точка «*m*», рис. 2.15) і кінцем до вільної фазі ЛЕП (рис. 2.15).

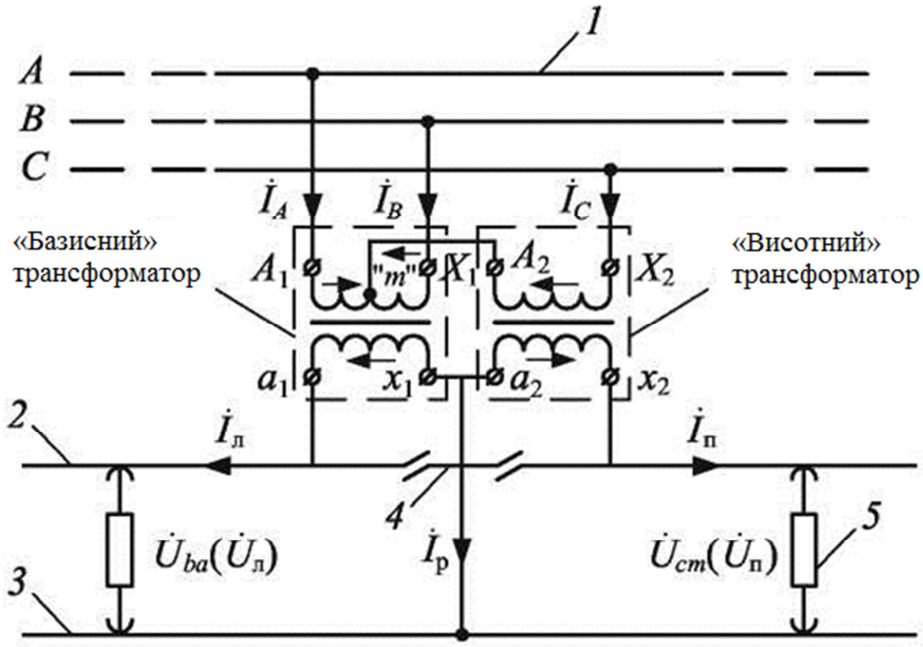


Рис. 2.15. Схема живлення тягової мережі однофазного струму при застосуванні на тяговій підстанції схеми Скотта:

1 – трифазна ЛЕП, *2* – контактна мережа, *3* – рейки, *4* – нейтральна вставка, *5* – електровоз

На вторинної (тягової) стороні обмотки трансформаторів між собою з'єднуються точно так же, як і в схемі відкритого трикутника: початок обмотки одного однофазного трансформатора з'єднується з кінцем обмотки іншого, отримана загальна точка підключається до рейок, а два вільних виводи трансформаторів, що залишилися приєднуються до контактної мережі: один на ліве плече живлення тягової підстанції, інший – на праве. Трансформатор, на первинну обмотку якого подається лінійна напруга ЛЕП, називається «базисним» або «основним». Інший трансформатор, первинна обмотка якого підключається до середньої точки первинної обмотки «базисного» і вільної фазі ЛЕП, називається «висотним» (рис. 2.15). Дані трансформатори, як правило, взаємозамінні.

На ліве плече живлення даної тягової підстанції, схема приєднання якої до ЛЕП та тягової мережі наведена на рис. 2.15, подається напруга $\acute{U}_{ba}$, а на праве – $\acute{U}_{cm}$. При застосуванні на тягових підстанціях схеми Скотта завантаження фаз системи, як і при використанні на підстанціях трифазних трансформаторів і схеми відкритого трикутника, виходить несиметричною. Але ступінь несиметрії в порівнянні з раніше розглянутими схемами виходить менше, а для окремого випадку, коли струми, напруги та зсув по фазі між напругою і струмом на плечах живлення підстанції однакові ($I_л = I_п$, $U_л = U_п$, $\varphi_л = \varphi_п$), вона дорівнює нулю.

Побудуємо векторну діаграму напруги для первинної сторони трансформатора підстанції, рис. 2.16.

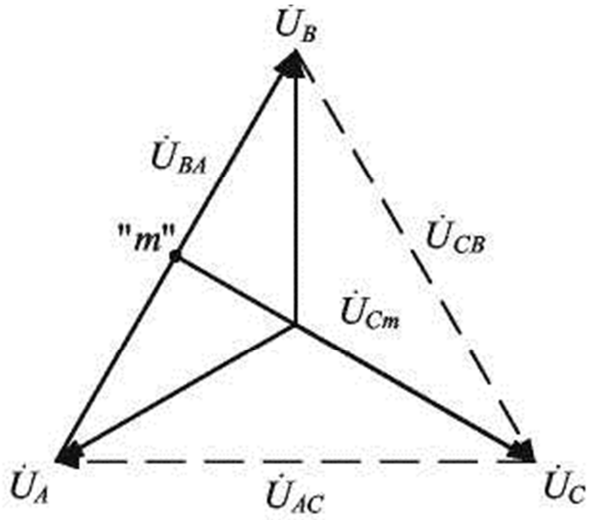


Рис. 2.16. Векторна діаграма напруги на первинній стороні при схемі Скотта

На рис. 2.16 наведені вектори фазних і лінійних напруг ЛЕП. Виділено вектор лінійної напруги $\acute{U}_{BA}$, який подається на первинну обмотку «базисного» трансформатора (рис. 2.15). Вектор, що з'єднує точку «*m*», розташовану на середині вектору $\acute{U}_{BA}$, з кінцем вектору $\acute{U}_{C}$, визначає напругу, що подається на первинну обмотку «висотного» трансформатора $\acute{U}_{Cm}$. Цей вектор є висотою рівностороннього трикутника. Звідки і умовна назва трансформатора – «висотний». Аналіз побудованої діаграми показує:

– напруга, що подається на первинну обмотку «висотного» трансформатора, за величиною відмінна від напруги на первинній обмотці «базисного» і становить – $\sqrt{3}/2\ U_{BA}$;

– кут зсуву між векторами напруги первинних обмоток «базисного» і «висотного» трансформаторів становить 90°.

Так як напруги на первинних обмотках «базисного» і «висотного» трансформаторів різні, а на вторинних обмотках однакові, коефіцієнти трансформації трансформаторів будуть не рівні. Кількість витків первинної обмотки «висотного» трансформатора становитиме $\sqrt{3}/2$ кількості витків «базисного».

Векторна діаграма напруги і струмів на боці 27,5 кВ наведена на рис. 2.17.

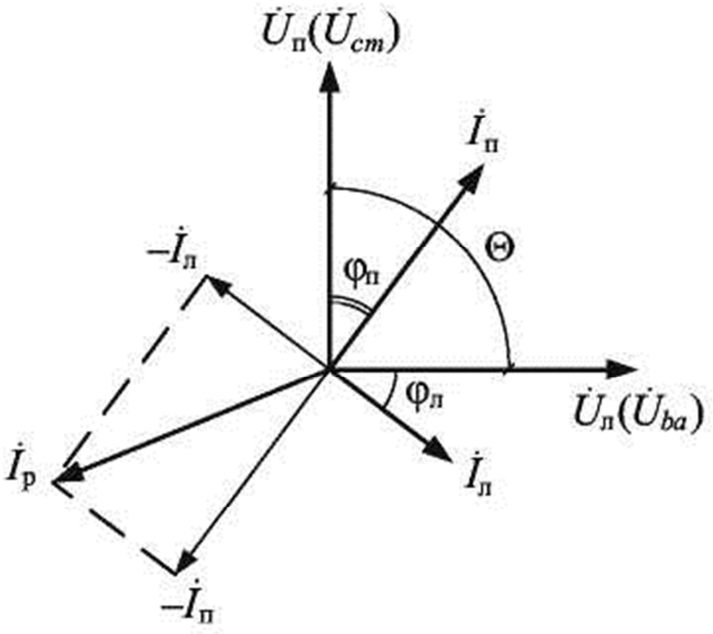


Рис. 2.17. Векторна діаграма напруги і струмів на боці 27,5 кВ при схемі Скотта

Струм лінії, що відсмоктує тягової підстанції $\dot{I}_{\text{р}}$ у схемі Скотта при $\varphi_{\text{л}} = \varphi_{\text{п}}$ з урахуванням, що кут між векторами напруги плечей живлення $U_{\text{л}}$ і $U_{\text{п}}$, позначений як θ, становить 90°, дорівнює (рис. 2.17).

$$I_{\text{р}} = \sqrt{I_{\text{п}}^2 + I_{\text{л}}^2}\,. \tag{2.11}$$

Визначимо струми в фазах ЛЕП при відомих струмах плечей живлення підстанції. Позначимо кількість витків первинної обмотки «базисного» трансформатора через w_1 а кількість витків вторинних обмоток «базисного» і «висотного» трансформаторів через w_2. На підставі першого закону Кірхгофа для точки «*m*» можна записати (рис. 2.15)

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0. \tag{2.12}$$

Сума магніторушійних сил в трансформаторі (якщо знехтувати струмом холостого ходу) дорівнює нулю. Тоді для «базисного» трансформатора з урахуванням напрямку протікання струмів в його обмотках матимемо (рис. 2.15)

$$\dot{I}_A \frac{w_1}{2} - \dot{I}_B \frac{w_1}{2} - \dot{I}_{\text{л}} w_2 = 0\,. \tag{2.13}$$

Для «висотного» трансформатора отримаємо

$$\dot{I}_C \frac{\sqrt{3}}{2} w_1 - \dot{I}_{\text{п}} w_2 = 0\,. \tag{2.14}$$

Вирази (2.12-2.14) дозволяють знайти струми в фазах ЛЕП, створюваних тягової підстанцією. З (2.14) маємо

$$\dot{I}_C = \frac{2w_2}{\sqrt{3}w_1}\dot{I}_{\text{п}}. \qquad (2.15)$$

З (2.12) випливає

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B = -\dot{I}_C. \qquad (2.16)$$

На підставі (2.13) можна записати

$$\dot{I}_A - \dot{I}_B = \frac{2w_2}{w_1}\dot{I}_{\text{л}}. \qquad (2.17)$$

З урахуванням (2.15) отримуємо наступну систему двох рівнянь:

$$\begin{cases} \dot{I}_A + \dot{I}_B = -\dfrac{2w_2}{\sqrt{3}w_1}\dot{I}_{\text{п}} \\ \dot{I}_A - \dot{I}_B = \dfrac{2w_2}{w_1}\dot{I}_{\text{л}} \end{cases} \qquad (2.18)$$

Рішення системи двох рівнянь дозволяє знайти струми $\dot{I}_A$ і $\dot{I}_B$

$$\dot{I}_A = \frac{w_2}{w_1}\left(\dot{I}_{\text{л}} - \frac{1}{\sqrt{3}}\dot{I}_{\text{п}}\right). \qquad (2.19)$$

$$\dot{I}_B = -\frac{w_2}{w_1}\left(\dot{I}_{\text{л}} + \frac{1}{\sqrt{3}}\dot{I}_{\text{п}}\right). \qquad (2.20)$$

Отримані вирази для струмів фаз ЛЕП (2.15), (2.19) і (2.20) можуть бути використані для будь-якої схеми приєднання тягової підстанції, що працює за схемою Скотта. Тільки в лівій частині виразів символи фаз у струмів можуть

помінятися місцями, а в правій частині це може статися з струмами $\dot{I}_{л}$ і $\dot{I}_{п}$ в залежності від конкретної схеми приєднання підстанції до ЛЕП та тягової мережі.

В даний час розроблено декілька варіантів так званих симетрувальних трансформаторів, які в такій же мірі зменшують несиметрію струмів, як і схема Скотта, за рахунок зсуву між векторами напруги, що подаються на плечі живлення підстанції, рівного 90°.

Для забезпечення двостороннього живлення контактної мережі суміжна тягова підстанція повинна бути підключена до ЛЕП та тягової мережі так, щоб на її ліве плече живлення подавалося точно така ж напруга (від «базисного» або «висотного», з кінця або початку обмотки і при такому ж способі приєднання виводів первинної обмотки до фаз ЛЕП), як і на праве плече попередньої підстанції.

2.4 Система тягового електропостачання з симетрувальним трансформатором на опорних підстанціях

Як відомо, одним із суттєвих недоліків системи електропостачання змінного струму є несиметричне завантаження фаз ЛЕП. Виникає несиметрія струмів, що призводить до появи несиметрії напруги в ЛЕП, яка негативно позначається на роботі генераторів електростанцій і споживачів електроенергії від ЛЕП. Показником якості електроенергії відповідно до чинних вимог є коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю. Недотримання вимог до якості електроенергії призводить до значного економічного збитку.

Система тягового електропостачання, що використовує симетрувальні трансформатори на окремих тягових підстанціях, які запропоновано називати опорними, на відміну від усіх розглянутих раніше систем, крім основного завдання – забезпечення живлення тягових навантажень, вирішує завдання щодо поліпшення якості електроенергії в зовнішній частині системи електропостачання за рахунок істотного зменшення несиметрії струмів в ЛЕП, створюваної тяговим навантаженням. Підвищення якості пропонується здійснити за рахунок різкого скорочення на ділянці кількості тягових підстанцій, що мають безпосередній

вихід у зовнішню частину системи, використання трансформаторів, що володіють ефектом Скотта (кут між векторами напруги на вторинній стороні трансформатора 90°), і існуючої залежності величини, створюваної несиметрії струмів в трифазному колі тягової підстанції, від ступеня рівномірності завантаження її плечей. Як відомо, несиметрія струмів, обумовлена тяговою підстанцією, зменшується зі збільшенням ступеня рівномірності завантаження її плечей живлення.

При побудові даної системи електропостачання, як вже було зазначено, виділяють так звані опорні (що живлять) тягові підстанції, які підключаються безпосередньо до ЛЕП 110 (220) кВ. На таких підстанціях встановлюють спеціальні тягові трансформатори потужністю 63 (80 МВА), на вторинній стороні яких два вектори напруги 27,5 кВ і два вектори напруги 66,4 кВ зрушені відносно один одного на 90° [5]. На вторинній стороні трансформатор має 5 виводів, рис. 2.18.

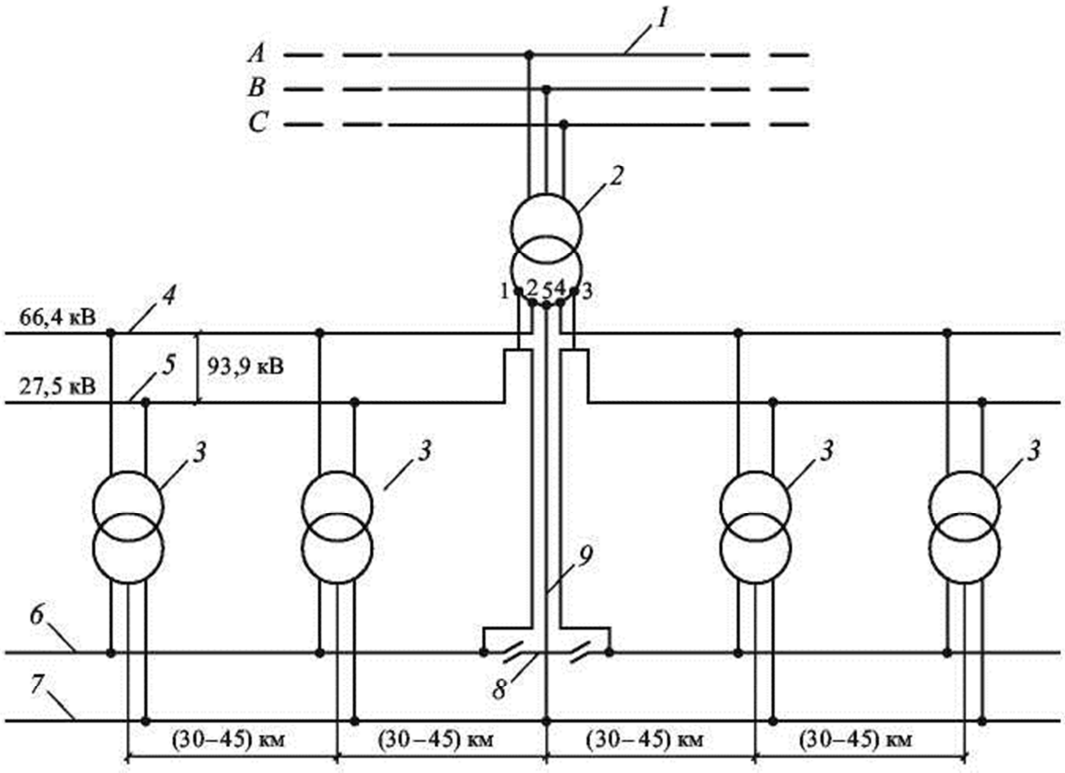


Рис. 2.18. Спрощена принципова схема системи електропостачання з симетрувальним трансформатором на опорних тягових підстанціях:

1 – трифазна ЛЕП, *2* – опорна тягова підстанція, *3* – проміжні тягові підстанції, *4* – перший додатковий провід, *5* – другий додатковий провід, *6* – контактна мережа, *7* – рейки, *8* – нейтральна вставка, *9* – лінія, що відсмоктує опорної тягової підстанції

П'ять виводів на вторинній стороні трансформатора дозволяють забезпечити такі рівні напруги (рис. 2.18):

$$U_{1\text{-}5} = U_{3\text{-}5} = 27{,}5 \text{ кВ}, U_{2\text{-}5} = U_{4\text{-}5} = 66{,}4 \text{ кВ}, U_{1\text{-}2} = U_{3\text{-}4} = 93{,}9 \text{ кВ}.$$

Зсув по фазі між зазначеними напругами $\acute{U}_{1\text{-}5}$ і $\acute{U}_{3\text{-}5}$; $\acute{U}_{2\text{-}5}$ і $\acute{U}_{4\text{-}5}$; $\acute{U}_{1\text{-}2}$ і $\acute{U}_{3\text{-}4}$ складає 90° [5].

Вздовж залізничної дороги прокладаються два додаткових дроти, що утворюють подовжню лінію електропостачання. На перший з них подається напруга 66,4 кВ, на другий – 27,5 кВ (рис. 2.18). Від опорної підстанції отримує живлення контактна мережа на 27,5 кВ і поздовжні лінії електропостачання на 93,9 кВ. Від лінії поздовжнього електропостачання живляться проміжні тягові підстанції з однофазними трансформаторами потужністю 16 (25) МВА з відстанями між ними 30-45 км. Відстань між опорними тяговими підстанціями, що мають вихід в мережу загального призначення, становить 300-350 км [5].

Відомо, що схема Скотта володіє кращими показниками по несиметрії струмів в порівнянні зі схемою з трифазним трансформатором і схемою відкритого трикутника [6]. Але при значній нерівномірності навантажень по плечах живлення тягової підстанції її показники за величиною несиметрії струмів несуттєво краще. Тому ефективність даної системи електропостачання багато в чому залежить від того, наскільки струми плечей живлення опорних підстанцій будуть близькі. Треба відзначити, що при такій системі створюються передумови для певного вирівнювання струмів по плечах живлення опорних тягових підстанцій за рахунок того, що між опорними підстанціями знаходиться досить велика кількість проміжних підстанцій, що живляться від лінії поздовжнього електропостачання 93,9 кВ.

На опорних тягових підстанціях встановлюються по два трансформатора. Що ж стосується проміжних підстанцій, то установка на них по одному однофазному трансформатору призведе до певних труднощів в забезпеченні якісного електропостачання поїздів і нормальній роботі системи в разі виходу з роботи трансформатора однієї з підстанцій. У даній системі електропостачання труднощі виникають і при живленні нетягових споживачів.

РОЗДІЛ 3
НЕСИМЕТРІЯ СТРУМІВ І НАПРУГ, ЩО ВИНИКАЄ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА ДІЛЯНКАХ ЗМІННОГО СТРУМУ

3.1 Причини виникнення несиметрії струмів і напруг на ділянках змінного струму

Електричний локомотив змінного струму є чисто однофазним навантаженням, до того ж навантаженням великої потужності. Тягова підстанція змінного струму має, як правило, два плеча живлення. На кожне плече подається напруга тієї чи іншої фази живильної системи. Таким чином, кожна тягова підстанція, підключена до трифазної мережі, живить тільки два однофазні навантаження. Тому створювані електричною тягою навантаження в трифазній електричній мережі I_A, I_B, I_C не є симетричними, тобто в окремих її фазах протікають різні струми, рис. 3.1.

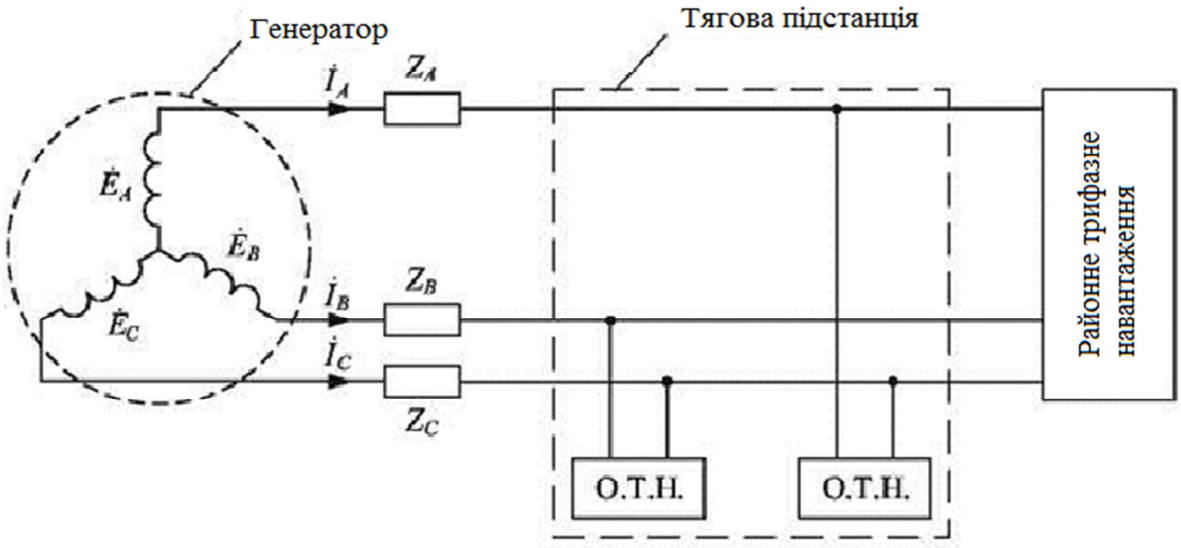


Рис. 3.1. Умовна принципова схема живлення тягового навантаження і районного трифазного навантаження від енергосистеми: О.Т.Н. – однофазне тягове навантаження

Різні струми в фазах ЛЕП при їх однакових опорах Z_A, Z_B, Z_C призводять до різних втрат і рівнів напруги в них, тобто до несиметрії напруги, що підводиться до трифазних приймачів електричної енергії (рис. 3.1). Відповідно до

термінології, прийнятої в теоретичній електротехніці, під трифазним ланцюгом будемо розуміти сукупність однофазних ланцюгів, з яких вона складається. Якщо комплекси опорів всіх фаз однакові Z_A, Z_B, Z_C (рис. 3.1), то таке трифазне коло називається симетричним, а в іншому випадку – несиметричним.

Якщо в трифазному ланцюзі всі ЕРС, напруги та струми по фазах рівні між собою і зсунуті на 120°, то такі системи ЕРС, напруги і струмів називають симетричними системами. В іншому випадку, якщо модулі однойменних величин не рівні один одному, або кути між цими величинами не рівні 120°, то такі системи називаються несиметричними.

Як відомо, симетрична система напруг може бути представлена трьома рівняннями:

$$\begin{aligned} U_A &= U_m \sin(\omega t + \psi_0); \\ U_B &= U_m \sin(\omega t + \psi_0 - 120°); \\ U_C &= U_m \sin(\omega t + \psi_0 - 240°); \end{aligned} \qquad (3.1)$$

де ψ_0 – початкова фаза напруги U_A.

При користуванні символічним методом ці ж рівняння можна представити в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} \dot{U}_A &= U e^{j\psi_0} = \dot{U}; \\ \dot{U}_B &= U e^{j(\psi_0 - 120^\circ)} = U e^{j\psi_0} e^{-j120^\circ} = \dot{U} e^{-j120^\circ}; \\ \dot{U}_C &= U e^{j(\psi_0 - 240^\circ)} = U e^{j\psi_0} e^{-j240^\circ} = \dot{U} e^{-j240^\circ} \end{aligned} \qquad (3.2)$$

де $e^{j\psi_0}$ – комплексний множник,

$$e^{j120^\circ} = e^{j-240^\circ} = a, \; e^{j240^\circ} = e^{j-120^\circ} = a^2.$$

Тоді вирази (3.2) для симетричної системи напруги можна записати в

такий спосіб:

$$\dot{U}_A = \dot{U}\,,\ \dot{U}_B = a^2\dot{U}\,,\ \dot{U}_C = a\dot{U}\,. \qquad (3.3)$$

Виходячи з методу симетричних складових будь-яка несиметрична трифазна система може бути розкладена на три симетричні складові: прямий, зворотної та нульової послідовності, які можуть бути зображені трьома системами векторів.

Кожна фазна напруга несиметричної системи в загальному випадку може бути представлено наступними трьома рівняннями:

$$\begin{aligned} \dot{U}_A &= \dot{U}_{A(1)} + \dot{U}_{A(2)} + \dot{U}_{A(0)}; \\ \dot{U}_B &= \dot{U}_{B(1)} + \dot{U}_{B(2)} + \dot{U}_{B(0)}; \\ \dot{U}_C &= \dot{U}_{C(1)} + \dot{U}_{C(2)} + \dot{U}_{C(0)}. \end{aligned} \qquad (3.4)$$

де $\acute{U}_{A(1)}$, $\acute{U}_{A(2)}$ і $\acute{U}_{A(0)}$ – відповідно напруги прямої, зворотної та нульової послідовностей для фази А.

Оскільки вектори прямої і зворотної послідовності утворюють симетричні системи, то, скориставшись (3.3), можна написати:

– для прямої послідовності

$$\acute{U}_{B(1)} = a^2\acute{U}_{A(1)},\ \acute{U}_{C(1)} = a\acute{U}_{A(1)};$$

– для зворотній послідовності

$$\acute{U}_{A(0)} = \acute{U}_{B(0)} = \acute{U}_{C(0)} = \acute{U}_{(0)}.$$

– і для нульової послідовності

$$\acute{U}_{B(2)} = a\acute{U}_{A(2)},\ \acute{U}_{C(2)} = a^2\acute{U}_{A(2)}.$$

Тоді вирази (3.4) можна переписати в наступному вигляді

$$\begin{aligned}
\dot{U}_A &= \dot{U}_{A(1)} + \dot{U}_{A(2)} + \dot{U}_{A(0)};\\
\dot{U}_B &= a^2\dot{U}_{A(1)} + a\dot{U}_{A(2)} + \dot{U}_{A(0)};\\
\dot{U}_C &= a\dot{U}_{A(1)} + a^2\dot{U}_{A(2)} + \dot{U}_{A(0)}.
\end{aligned} \qquad (3.5)$$

Спільне рішення наведеної системи рівнянь (3.5) дозволяє визначити $\acute{U}_{A(l)}$, $\acute{U}_{A(2)}$, $\acute{U}_{A(0)}$.

$$\begin{aligned}
\dot{U}_{A(1)} &= \frac{1}{3}\left(\dot{U}_A + a\dot{U}_B + a^2\dot{U}_C\right);\\
\dot{U}_{A(2)} &= \frac{1}{3}\left(\dot{U}_A + a^2\dot{U}_B + a\dot{U}_C\right);\\
\dot{U}_{(0)} &= \frac{1}{3}\left(\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C\right).
\end{aligned} \qquad (3.6)$$

Аналогічні вирази можна написати і для несиметричної системи струмів

$$\begin{aligned}
\dot{I}_{A(1)} &= \frac{1}{3}\left(\dot{I}_A + a\dot{I}_B + a^2\dot{I}_C\right);\\
\dot{I}_{A(2)} &= \frac{1}{3}\left(\dot{I}_A + a^2\dot{I}_B + a\dot{I}_C\right);\\
\dot{I}_{(0)} &= \frac{1}{3}\left(\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C\right).
\end{aligned} \qquad (3.7)$$

При електричній тязі на змінному струмі в живильній електричній трифазній мережі протікають тільки струми прямої і зворотної послідовностей.

В симетричних колах симетричні складові струмів і напруг однієї послідовності не впливають на струми і напруги іншій послідовності. Викладене відноситься як до статичних ланцюгів, так і до ланцюгів, що містить обертові машини з симетричними обмотками. Оскільки симетричні складові струмів викликають падіння напруги тій же послідовності, то можна говорити про опір ланцюга тій чи іншій послідовності, тобто про повний опір струмів прямої, зворотної і, якщо має місце чотирипровідне коло, нульової послідовностей. У симетричних колах повні опори прямої і зворотної послідовностей для статичних пристроїв однакові (опір нульової послідовності може від них відрізнятися), для обертових машин, як правило, ці опори істотно різні.

3.2 Показники, що характеризують величину несиметрії струмів і напруг

Оцінка несиметрії струмів або напруг в трифазних мережах проводиться за допомогою коефіцієнтів несиметрії струмів або напруг. В технічній літературі поширене визначення коефіцієнта несиметрії K_2 як відношення діючого значення струму або напруги зворотної послідовності I_2, U_2 до діючого значення струму і напруги прямої послідовності I_1, U_1 основної частоти трифазної системи струмів або напруг [7].

Коефіцієнт несиметрії струмів дорівнює

$$K_{2I} = \frac{I_2}{I_1} \text{ або } K_{2I}\% = \frac{I_2}{I_1}100\%. \tag{7.8}$$

Аналогічно для несимметрії напруг маємо

$$K_{2U} = \frac{U_2}{U_1} \text{ або } K_{2U}\% = \frac{U_2}{U_1}100\%. \tag{7.9}$$

Однак ці величини коефіцієнтів для елементів пристроїв системи

електропостачання не є достатньо характерними. Дійсно, наприклад, коефіцієнт несиметрії струмів може бути великий, але струми прямої і зворотної послідовностей суттєво нижче номінального навантаження розглянутого пристрою (наприклад, генератора електростанції). Та, навпаки, струм зворотної послідовності може бути в кілька разів більше, ніж в попередньому випадку при меншому коефіцієнті несиметрії, якщо струм прямої послідовності досить великий. Тому такий коефіцієнт несиметрії струмів, що характеризує ступінь спотворення трифазної системи, практично не визначає впливу цієї несиметрії на потужність генератора.

Значно ціннішим є відносний коефіцієнт несиметрії струмів K'_{2I}, що являє собою відношення струму зворотної послідовності до номінального струму генератора $I_{\text{н}}$, на який оцінюється вплив струмів зворотній послідовності

$$K'_{2I} = \frac{I_2}{I_{\text{н}}} \text{ або } K_{2I}\% = \frac{I_2}{I_{\text{н}}}100\%. \tag{3.10}$$

Враховуючи, що різниця між номінальною напругою мережі $U_{\text{н}}$ і U_1 дуже незначна, то K_{2U} визначають за виразом

$$K'_{2U} = \frac{U_2}{U_{\text{н}}} \text{ або } K_{2U}\% = \frac{U_2}{U_{\text{н}}}100\%.$$

Коефіцієнт несиметрії напруги зворотної послідовності K_{2U} допускається визначати [7]:

1. Методом симетричних складових.

2. Обчисленням за наближеними формулами значення напруги прямої і зворотної послідовності для основної частоти:

$$U_1 = \frac{1}{3}\left(U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}\right), \tag{3.11}$$

$$U_2 = 0{,}62\left(U_{\max} - U_{\min}\right),$$

де U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} – міжфазні (лінійні) напруги трифазної системи, що розглядається;

U_{max}, U_{min} – найбільше та найменше значення з трьох міжфазних напруг основної частоти.

3. Експериментальним шляхом. Для кожного *i*-го спостереження за період часу, рівний 24 годинам, вимірюють одночасно діючі значення міжфазних напруг по основній частоті. Потім обчислюють значення напруги прямої і зворотної послідовностей за такими виразами для *i*-го спостереження [7].

$$U_{1i} = \sqrt{\frac{1}{12}\left[\left\{\sqrt{3}U_{ABi} + \sqrt{4U_{BCi}^2 - \left(\frac{U_{BCi}^2 - U_{CAi}^2}{U_{ABi}} + U_{ABi}\right)^2}\right\}^2 + \left(\frac{U_{BCi}^2 - U_{CAi}^2}{U_{ABi}}\right)^2\right]}$$

(3.12)

$$U_{2i} = \sqrt{\frac{1}{12}\left[\left\{\sqrt{3}U_{ABi} - \sqrt{4U_{BCi}^2 - \left(\frac{U_{BCi}^2 - U_{CAi}^2}{U_{ABi}} + U_{ABi}\right)^2}\right\}^2 + \left(\frac{U_{BCi}^2 - U_{CAi}^2}{U_{ABi}}\right)^2\right]}$$

Визначають коефіцієнт несиметрії напруги для *i*-го спостереження

$$K_{2Ui}\% = \frac{U_{2i}}{U_{1i}}100\% \text{ або } K_{2Ui}\% = \frac{U_{2i}}{U_{\text{н.мф}}}100\%,$$

де $U_{\text{н.мф}}$ – номінальне значення міжфазної напруги.

Обчислюють значення коефіцієнта несиметрії напруги за такою формулою:

$$K_{2U} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} K_{2Ui}^2}{N}},$$

де N – кількість спостережень. Кількість спостережень N повинно бути не менше дев'яти за одну хвилину.

3.3 Негативні наслідки несиметрії струмів і напруг. Допустимі значення коефіцієнтів несиметрії

Як відомо з теорії роботи електричних машин [4], несиметричне навантаження генераторів призводить до підвищеного нагрівання їх обмоток і сталі статорів і роторів. Крім того, в цих умовах спостерігається збільшена вібрація окремих частин машини. Все це може привести до порушення нормальних умов її роботи і до зменшення тривалості роботи генератора з номінальним навантаженням. Причому, незначне збільшення несиметрії струмів призводить до дуже суттєвого зменшення тривалості роботи з номінальним струмом. Так, якщо при відносному коефіцієнті несиметрії струмів 0,08 генератор з номінальним струмом може працювати тривалий час, то при несиметрії 0,12 тільки 10 хв., а при несиметрії 0,28 лише 3 хв. [3]. Додатковий нагрів обмоток ротора генератора можна пояснити за допомогою рис. 3.2.

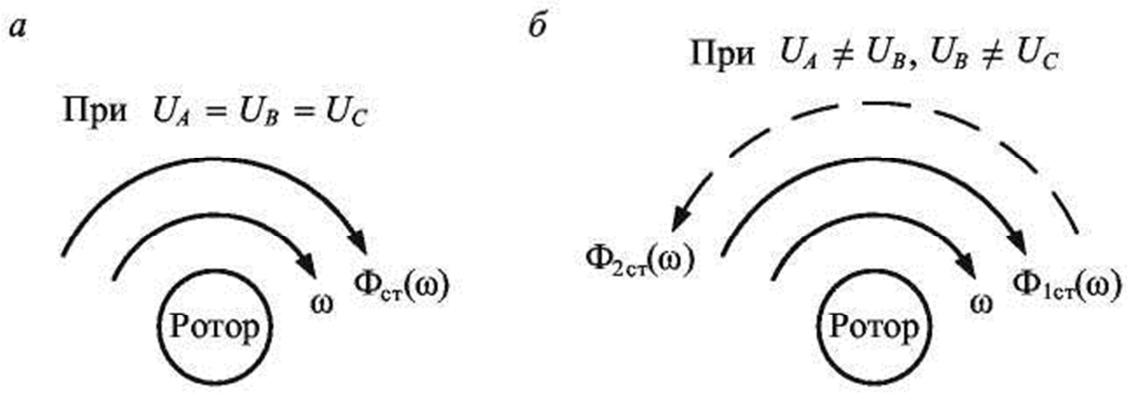


Рис. 3.2. Напрямок обертання ротора і магнітного поля статора при:

а – симетричному навантаженні фаз генератора; *б* – несиметричного навантаження фаз генератора

На рис. 3.2 умовно показані напрямки обертання ротора з кутовою швидкістю ω і магнітного поля статора синхронного генератора при симетричному і несиметричному навантаження його фаз. У першому випадку швидкість обертання ротора і магнітного потоку статора $\Phi_{ст}$ збігаються і спрямовані узгоджено (рис. 3.2, а). Тому в обмотці ротора струм від магнітного потоку $\Phi_{ст}$ не наводить. При несиметричному навантаженні фаз генератора магнітний потік статора представлений магнітним потоком, обумовленим струмом прямої послідовності $\Phi_{1ст}$ (ω), і магнітним потоком статора, обумовленим струмом зворотної послідовності $\Phi_{2ст}$ (ω), що обертається зустрічно по відношенню до ротора (рис. 3.2, б). Цей магнітний потік наводить в обмотці ротора струм, який викликає її додатковий нагрів. Для турбогенераторів допустиме значення відносного коефіцієнта несиметрії струмів становить 5%, а для гідрогенераторів 10%.

Розглянемо вплив несиметрії напруги на роботу трифазних асинхронних двигунів, які є основними споживачами електричної енергії у всіх галузях господарства. Несиметрія напруги призводить до зменшення максимального моменту двигуна і збільшення його нагрівання.

При симетричній трифазній системі напруги в асинхронному двигуні створюється обертове магнітне поле з постійною величиною потоку. При несиметричній системі напруг магнітне поле може бути розкладено на два, що обертаються в різні сторони відповідно до симетричних складових напруги прямої і зворотної послідовностей. Обидва поля створюють свої обертаючі моменти, що діють в протилежних напрямках.

Максимальний крутний момент асинхронного двигуна пропорційний квадрату напруги на його затискачах. Тому наближено загальний крутний момент M визначають [3] як різницю двох моментів $M = M_1 - M_2$, M_1 пропорційний квадрату напруги прямої послідовності, M_2 – квадрату напруги зворотної послідовності.

Так як напруга прямої послідовності близька до номінальної $U_н$, то $M_1 = cU_н^2$, де c – коефіцієнт пропорційності, що залежить від постійних машини.

Момент $M_2 = cU_2^2 = c(K_{2U}\, U_н)$, де K_{2U} – коефіцієнт несиметрії напруги. Відповідно,

$$M = M_1 - M_2 = cU_н^2(1 - K^2_{2U}). \qquad (3.13)$$

З (3.13) випливає, що якщо K_{2U} = 0,1 (тобто 10%, а зазвичай допускається значно менша несиметрія), то зміна крутного моменту складе не більше 0,01 (тобто 1%). Таким чином, значення коефіцієнта несиметрії напруги, що зустрічаються на практиці не роблять якого-небудь помітного впливу на максимальний крутний момент асинхронного двигуна.

На нагрівання двигуна напруга зворотної послідовності створює значно сильніший вплив. Пояснюється це тим, що опір зворотної послідовності асинхронного двигуна значно менше опору прямої послідовності, тому навіть при невеликій величині напруги зворотної послідовності струм, зумовлений нею, виходить більшим.

При одному і тому ж коефіцієнті несиметрії напруги кут між симетричними складовими прямої і зворотної послідовності однойменних фаз може бути різним. Для самого несприятливого випадку, коли в одній з фаз обмотки статора струми прямої і зворотної послідовностей збігаються по фазі, сумарний струм не повинен перевищувати номінальний. Тоді

$$I_1 + I_2 = I_н, \qquad (3.14)$$

де $I_2 = U_2/Z_2 = K_{2U}U_н/Z_2$,

Z_2 – повний опір кола струму зворотної послідовності.

Опір зворотній послідовності близький за значенням до опору короткого замикання $Z_к$. Прийнявши, що $I_2 \approx K_{2U}U_н/Z_к = K_{2U}I_к$ і підставивши цей вираз в (3.14), отримаємо допустимий струм прямої послідовності

$$I_1 = I_н - K_{2U}I_к = I_н(1 - K_{2U}I_к/I_н); \qquad (3.15)$$

Позначивши $I_к/I_н$ = β і назвавши це відношення кратністю струму короткого замикання, отримаємо розрахункову формулу допустимого струму прямої послідовності

$$I_1/I_н = 1 – K_{2U}\beta. \quad (3.16)$$

З виразу (3.16) випливає, що при кратності струму короткого замикання β = 5 і K_{2U} = 20% наявна потужність двигуна, чи допустиме навантаження, дорівнює нулю.

Запропонована емпірична формула дає допустиме навантаження двигуна $P_{доп}$ у вигляді [6]:

$$P_{доп} = P_н \frac{\sqrt{1 – K_{2U}^2\beta^2}}{1 + K_{2U}^2\beta^2}, \quad (3.17)$$

де $P_н$ – номінальна потужність двигуна.

З (3.16) і (3.17) можна зробити висновок, що вже при невеликій несиметрії напруги може виявитися більш вигідним відключити одну фазу статора і змусити працювати двигун в однофазному режимі, при якому потужність може досягати 70-80% номінального значення.

Як вже зазначалося, напруга зворотної послідовності викликає струми зворотної послідовності, які, підсумовуючись з струмами прямої послідовності, призводять до збільшення нагрівання двигуна. При цьому нагрівається більше та фаза, де сумарний струм виходить найбільшим. Очевидно, що величина сумарного струму в фазі двигуна залежить від кута зсуву між струмами прямий і зворотної послідовностей.

Для уявлення про те, як впливає несиметрія напруги на відносний термін служби двигуна *T*, наводиться відповідна залежність у вигляді кривої (рис. 3.3) для постійної несиметрії і кута між векторами прямої і зворотної послідовностей, рівного нулю [6].

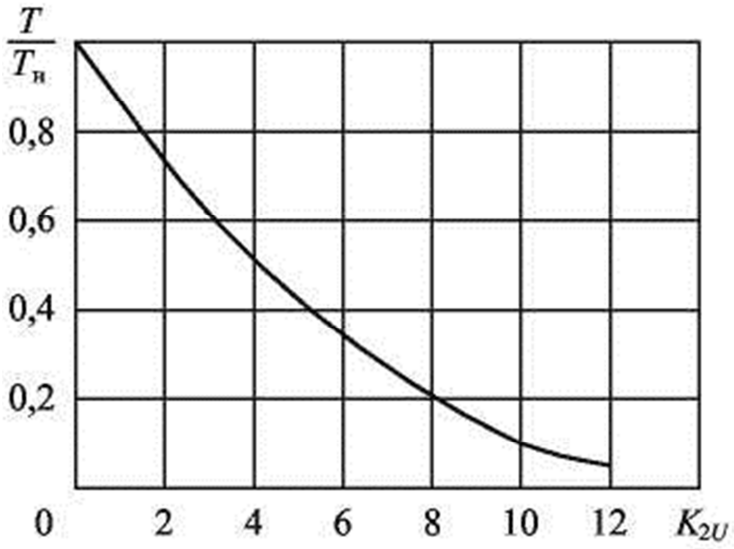


Рис. 3.3. До аналізу впливу постійної несиметрії напруги на відносне зниження терміну служби $T/T_н$ (де T та $T_н$ – фактичний і номінальний терміни служби)

У цьому випадку прийнято, що двигун при симетричній системі напруг завантажений на номінальну потужність $P_н$, реалізує номінальний термін служби $T_н$ і може працювати зі зниженою на 5% напругою.

Нерівність напруги по фазах негативно впливає на роботу освітлювальних ламп та інших однофазних приймачів електроенергії. Несиметрія напруги може в деякій мірі обумовлювати неоднакові напруги на плечах живлення тягових підстанцій.

Згідно [7] нормально допустиме значення коефіцієнта несиметрії напруги по зворотній послідовності в точках загального приєднання до електричних мереж складає 2,0 % для усіх класів напруг (низької, середньої та високої напруги). В деяких випадках дозволяється збільшити цей показник до 3% у разі приєднання однофазних споживачів згідно примітки п. 5.2.4 [7] для середньої напруги електропостачання (від 1 кВ до 35 кВ включно).

РОЗДІЛ 4
СПОСОБИ ПЕРЕТВОРЕННЯ ОДНОФАЗНИХ НАВАНТАЖЕНЬ В РІВНОМІРНУ ТРИФАЗНУ

4.1 Випадок одного однофазного тягового навантаження

Перехід з трифазної системи на однофазну для живлення тягових навантажень здійснюється на підстанціях, тому ступінь нерівномірності розподілу однофазного навантаження між фазами первинної трифазної системи залежить від типу трансформаторів і схем з'єднання їх обмоток.

Розглянемо випадок живлення одного однофазного навантаження від трифазної мережі, рис. 4.1.

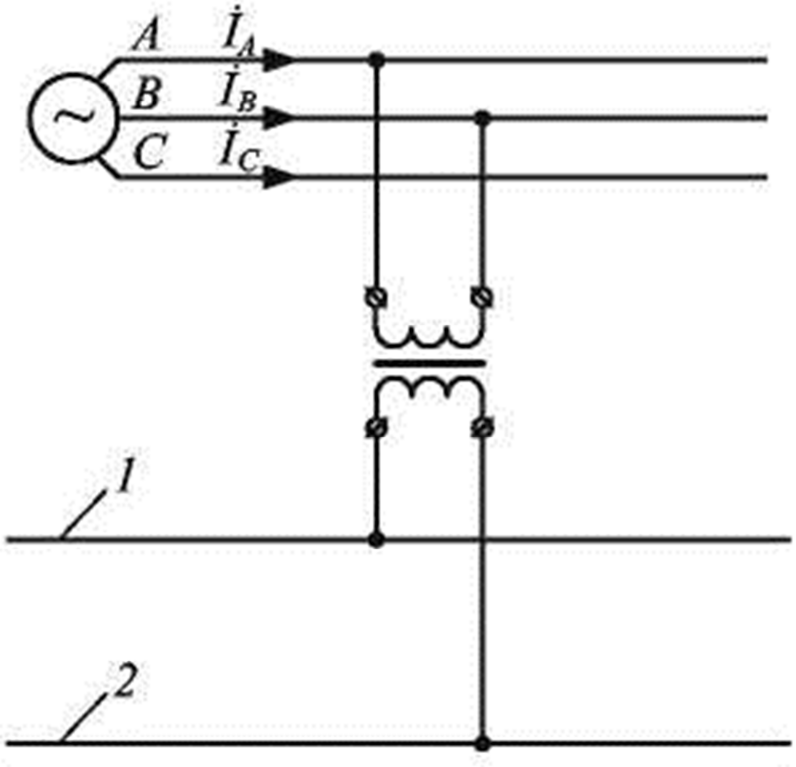


Рис. 4.1. Схема живлення тягової мережі від однофазного трансформатора:
1 – контактна мережа; *2* – рейки

Миттєві значення напруги і струму визначаються наступними виразами:

$$u = U_m \sin\omega t,\ i = I_m \sin(\omega t - \varphi)$$

де U_m, I_m – амплітудні значення напруги і струму;

φ – кут зсуву між напругою і струмом (навантаження споживача носить активно-індуктивний характер).

Тоді миттєва потужність однофазного споживача *s* дорівнює

$$s = ui = U_m I_m \sin\omega t \cdot \sin(\omega t - \varphi), \qquad (4.1)$$

Так як

$$\sin\omega t \cdot \sin(\omega t - \varphi) = ½[\cos\varphi - \cos(2\omega t - \varphi)],$$

то

$$s = ½U_m I_m[\cos\varphi - \cos(2\omega t - \varphi)],$$

або через діючі значення напруги і струму

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}},\ I = \frac{I_m}{\sqrt{2}},$$

$$s = U \cdot I\cos\varphi - U \cdot I\cos(2\omega t - \varphi), \qquad (4.2)$$

де перший доданок $s' = U \cdot I\cos\varphi$ являє собою постійну частину потужності, і другий $s'' = -U \cdot I\cos(2\omega t - \varphi)$ – частина потужності однофазного споживача, що коливається з подвійною частотою, рис. 4.2.

Середнє значення постійної частини потужності не змінюється в часі, тоді як середнє значення частини потужності, що коливається змінюється по синусоїді, дорівнює нулю. При зміні кута зсуву між напругою і струмом φ від нуля до π/2 постійна частина потужності змінюється від величини $U \cdot I$ до нуля, а амплітуда частини потужності, що коливається залишається постійною і рівною $U \cdot I$, змінюється тільки кут початкової фази.

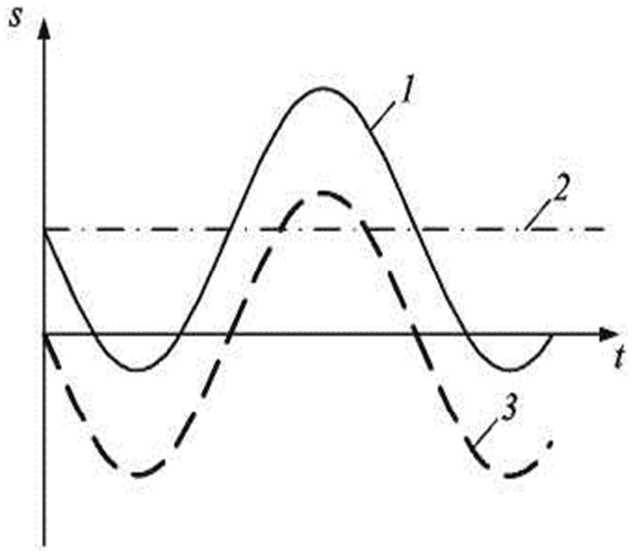


Рис. 4.2. Криві зміни потужності однофазного споживача:

1 – сумарна потужність; *2* – постійна складова потужності *s'*;

3 – частина потужності, що коливається *s"*

Таким чином, система однофазного струму з точки зору споживання потужності в часі є неврівноваженою системою. Ступінь неврівноваженості потужності системи визначають відношенням амплітуди частини потужності, що коливається $A_{s"}$ до повної, потужності що здається

$$\alpha_s = A_{s"}/U \cdot I = 1. \qquad (4.3)$$

При нерівномірному навантаженні трьох фаз трифазного кола криву загальної потужності можна отримати, підсумовуючи криві потужності окремих фаз. У зв'язку з тим, що крива потужності кожної фази складається з суми двох доданків - постійної і коливальної, то при визначенні потужності трифазної системи можна окремо скласти постійні і коливальні частини потужності окремих фаз. Коли навантаження всіх трьох фаз однакова ($I_A = I_B = I_C$) і кути зсуву між напругою і струмом теж рівні ($\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C$), то постійна частина потужності визначиться з наступного виразу:

$$s = s'_A + s'_B + s'_C = 3/2 U_m I_m \cos\varphi, \qquad (4.4)$$

або, замінивши амплітудні значення U_m і I_m через діючі значення напруги і струму, отримаємо

$$s' = 3U \cdot I\cos\varphi. \qquad (4.5)$$

Відомо, що сума трьох синусоїд, що змінюються з однією частотою, дає нову синусоїду, що змінюється з тією ж частотою. Сума ж трьох синусоїд з рівною амплітудою, зсунутих відносно один одного на кут $2\pi/3$, дає синусоїду з амплітудою, що дорівнює нулю, тобто пряму, що збігається з віссю абсцис

$$s'' = s''_A + s''_B + s''_C = UI\cos(2\omega t - \varphi) +$$
$$+ UI\cos(2\omega t - \varphi - 120°) + UI\cos(2\omega t - \varphi - 240°) = 0.$$

Отже, ступінь неврівноваженості потужності трифазної симетричної системи струму дорівнює нулю.

Таким чином, потужність при одному однофазному навантаженні величина не постійна в часі, а змінюється за законом синуса, а при симетричному трифазному навантаженні, навпаки, постійна в часі величина. Тому перетворення одного однофазного навантаження в рівномірну трифазну можливо тільки в разі перетворення змінної в часі потужності в постійну величину. Таке може виявитися реальним, коли частина енергії протягом напівперіоду буде запасатися в якомусь пристрої на тяговій підстанції, а в іншій напівперіод віддаватися споживачеві. Даний процес принципово можливий, якщо перетворення енергії на підстанції проводиться за допомогою обертових машин за рахунок зміни запасу кінетичної енергії обертових мас, або якщо в схему включені ємності за рахунок енергії електричного поля, або індуктивності за рахунок енергії магнітного поля [3]. Тому домогтися перетворення однофазного навантаження в симетричну трифазну систему яким завгодно з'єднанням обмоток трансформаторів або самих трансформаторів неможливо.

4.2 Випадок двох однофазних навантажень

На вітчизняних залізницях змінного струму майже повсюдно на тягових підстанціях застосовуються трифазні трансформатори зі схемою з'єднання обмоток Y/Δ-11 (рис. 4.3). На плечі живлення підстанції подається напруга двох фаз живильної системи.

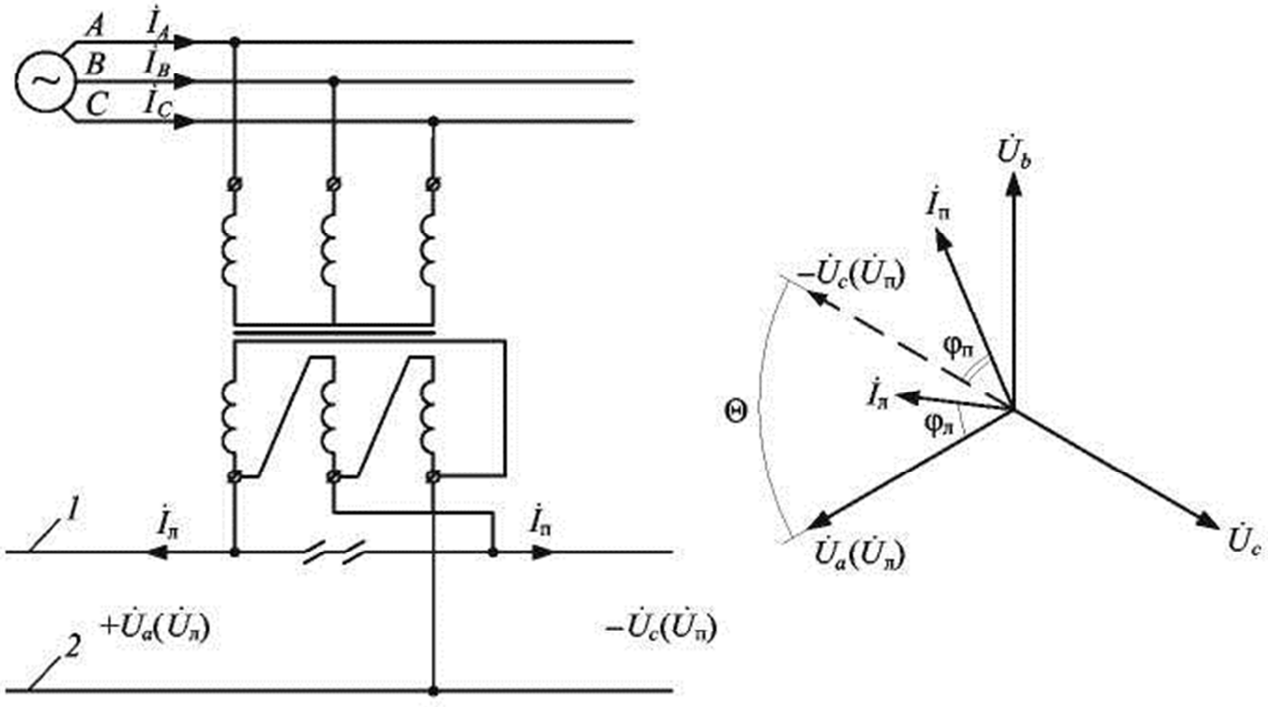


Рис. 4.3. Схема живлення тягової мережі від трифазного трансформатора:

1 – контактна мережа; *2* – рейки

Цікавим є розглянути питання про можливість симетрування навантаження трифазної системи при живленні від неї двох однофазних навантажень. Якщо два однофазні навантаження, що живляться від різних фаз трифазної системи, рівні за величиною, то постійна частина потужності подвоїться, а частина потужності, що коливається залишається незмінною, так як сума двох синусоїд, зсунутих на кут 2π/3, створює синусоїду, рівну і протилежну по фазі синусоїді третьої неробочої фази. З цього випливає, що частина потужності, що коливається щодо постійної частини потужності зменшується в два рази, ступінь неврівноваженості системи дорівнює $\alpha_s = 0{,}5$.

Для того щоб сумарна потужність була постійною величиною, необхідно взаємно компенсувати коливальні складові потужності обох однофазних кіл

$$s_л'' = s_п''. \tag{4.6}$$

Для лівого плеча живлення тягової підстанції по аналогії з (4.2) можна записати (рис. 4.3)

$$s_л = U_л I_л[\cos\varphi_л - \cos(2\omega t - \varphi_л)], \tag{4.7}$$

де постійна частина потужності

$$s_л' = U_л I_л \cos\varphi_л, \tag{4.8}$$

а складова потужності, що коливається

$$s_л'' = U_л I_л \cos(2\omega t - \varphi_л). \tag{4.9}$$

Якщо для правого однофазного ланцюга напруга $\acute{U}_п$ відстає від напруги лівого однофазного ланцюга $\acute{U}_л$ на кут θ (рис. 4.3), то

$$\begin{aligned} U_п &= U_{mп}\sin(\omega t - \theta); \\ I_п &= I_{mп}\sin(\omega t - \theta - \varphi_п). \end{aligned} \tag{4.10}$$

Звідси

$$s_п = U_п I_п[\cos\varphi_п - \cos(2\omega t - 2\theta - \varphi_п)]. \tag{4.11}$$

де постійна частина потужності

$$s'_п = U_п I_п \cos\varphi_п,$$

а частина, що коливається

$$s''_{п} = U_{п}I_{п}\cos(2\omega t - 2\theta - \varphi_{п}), \qquad (4.12)$$

Для виконання умови (4.6) прирівняємо вирази (4.9) і (4.12)

$$U_{л}I_{л}\cos(2\omega t - \varphi_{л}) = - U_{п}I_{п}\cos(2\omega t - 2\theta - \varphi_{п}).$$

Якщо прийняти, що струми і напруга лівого і правого плечей живлення однакові

$$U_{л} = U_{п},\ I_{л} = I_{п},$$

то

$$\cos(2\omega t - \varphi_{л}) = - \cos(2\omega t - 2\theta - \varphi_{п})$$

або

$$\cos(2\omega t - \varphi_{л}) = \cos(2\omega t - 2\theta - \varphi_{п} \pm \pi).$$

Тоді

$$2\omega t - \varphi_{л} = 2\omega t - 2\theta - \varphi_{п} \pm \pi;$$

$$\varphi_{п} - \varphi_{л} = - 2\theta \pm \pi \qquad (4.13)$$

Так як $(\varphi_{п} - \varphi_{л})$ не може бути за абсолютною величиною більше π, то при $\theta > 0$ в другій частині рівності перед π повинен бути знак плюс, при $\theta < 0$ перед π повинен бути знак мінус.

З рівняння (4.13) випливає, що

$$\theta = (\varphi_{л} - \varphi_{п})/2 \pm \pi/2. \qquad (4.14)$$

Отже, симетричне навантаження трифазного ланцюга при живленні від нього двох однофазних ланцюгів можна отримати тільки при виконанні рівності повних потужностей обох однофазних ланцюгів і виконання умови (4.14). Для випадку, коли при рівності повних потужностей кути зсуву між напругою і струмом для лівого і правого однофазного навантаження однакові ($\varphi_л = \varphi_п$), то кут $\theta = \pm \pi/2$, що має місце при схемі Скотта.

Для трифазного трансформатора зі схемою з'єднання обмоток Y/Δ–11, що застосовується на тягових підстанціях вітчизняних залізниць, $\theta = \pi/3$ (рис. 4.3). Тоді виходячи з (4.14) маємо

$$\pi/3 = (\varphi_л - \varphi_п)/2 + \pi/2. \qquad (4.15)$$

Звідки

$$\varphi_п - \varphi_л = \pi/3. \qquad (4.16)$$

В умовах експлуатації $\varphi_п = \varphi_л$, тому вираз (4.16) може бути виконано або за рахунок збільшення кута $\varphi_п$, або за рахунок зменшення кута $\varphi_л$. Перше може бути досягнуто за рахунок включення на правому плечі живлення даної підстанції (рис. 4.3) паралельно навантаженню індуктивності, а друге забезпечується за рахунок включення на лівому плечі живлення паралельно навантаженню ємності. Для підстанції на рис. 4.3 на ліве плече живлення подається напруга «відстаючої» фази, а на праве – «випереджаючої». Таким чином, для зменшення несиметрії струмів, створюваної тяговим навантаженням в фазах живлячої системи, на тягових підстанціях з трифазним трансформатором на плече живлення з «відстаючою» фазою паралельно навантаженню необхідно включити ємність, а на плече живлення з «випереджаючою» фазою – індуктивність.

Це відноситься і до тягових підстанцій зі схемою відкритого трикутника.

4.3 Коефіцієнт несиметрії струмів, обумовлений навантаженням однієї тягової підстанції

Для оцінки несиметрії струмів, створюваної навантаженням однієї тягової підстанції, скористаємося положенням, що при симетричній системі напруг і несиметричній системі струмів при відсутності нульової послідовності ступінь несиметрії струмів може бути виміряна ступенем неврівноваженості потужності.

Розглянемо підстанцію з трифазним трансформатором, схема приєднання якої до ЛЕП та тягової мережі приведена на рис. 4.3.

Використовуючи рівняння (4.7) і (4.11), визначимо сумарну повну потужність лівого і правого плечей живлення підстанції ($s_л + s_п$), прийнявши $U_л = U_п = U$.

$$s_л + s_п = U(I_л\cos\varphi_л + I_п\cos\varphi_п) - U[I_л\cos(2\omega t - \varphi_л) + I_п\cos(2\omega t - 2\theta - \varphi_п)]. \quad (4.17)$$

Постійна частина потужності s' дорівнює

$$s' = s'_л + s'_п = U(I_л\cos\varphi_л + I_п\cos\varphi_п) \quad (4.18)$$

Коливальна складова потужності s'' визначається виразом

$$s'' = s''_л + s''_п = - U[I_л\cos(2\omega t - \varphi_л) + I_п\cos(2\omega t - 2\theta - \varphi_п)]. \quad (4.19)$$

Для визначення суми в круглих дужках в (4.18) і суми в квадратних дужках в (4.19) умовно з'єднаємо вектори напруги лівого і правого плечей живлення, позначивши їх як єдиний вектор $\acute{U}$ рис. 4.4 і 4.5.

Склавши геометрично $I_л$ і $I_п$, визначивши їх рівнодіючу за теоремою косинусів та позначивши кут між нею і вектором напруги $\acute{U}$ через φ_0' (рис. 4.4), постійну частину потужності можна представити в наступному вигляді

$$s' = U\sqrt{I_л^2 + I_п^2 - 2I_л I_п\cos\left[180^\circ - (\varphi_л - \varphi_п)\right]}\cos\varphi_0',$$

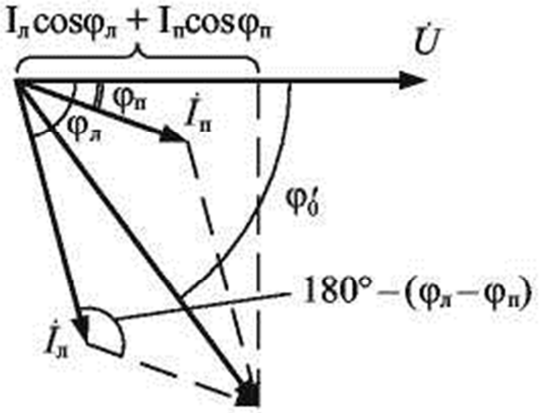


Рис. 4.4. Розрахункова векторна діаграма струмів і напруги для визначення постійної частини потужності двох однофазних ланцюгів

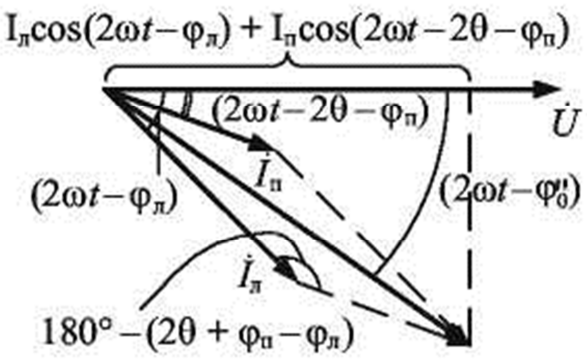


Рис. 4.5. Розрахункова векторна діаграма струмів і напруги для визначення частини потужності двох однофазних систем, що коливається

або

$$s' = U\sqrt{I_л^2 + I_п^2 + 2I_л I_п \cos(\varphi_л - \varphi_п)}\cos\varphi'_0. \qquad (4.20)$$

Вчинивши аналогічним чином для коливальної складової потужності і позначивши кут між рівнодіючим вектором струму та напругою $\dot{U}$ через $(2\omega t - \varphi_0'')$ (рис. 4.5), отримаємо

$$s'' = U\sqrt{I_л^2 + I_п^2 - 2I_л I_п \cos\left[180^\circ - (2\theta + \varphi_п - \varphi_л)\right]}\cos(2\omega t - \varphi''_0),$$

або

$$s'' = U\sqrt{I_л^2 + I_п^2 + 2I_л I_п \cos(2\theta + \varphi_п - \varphi_л)}\cos(2\omega t - \varphi''_0). \qquad (4.21)$$

Поклавши $\cos\varphi'_0 = 1$ визначимо повну потужність з виразу (4.20). При $\cos(2\omega t - \varphi''_0) = 1$ знайдемо амплітуду частини потужності, що коливається з формули (4.21). Визначимо ступінь неврівноваженості потужності трифазної

системи або, що те ж саме, коефіцієнт несиметрії струмів

$$\alpha_s = K_{2I} = \sqrt{\frac{I_{л}^2 + I_{п}^2 + 2I_{л}I_{п}\cos(2\theta + \varphi_{п} - \varphi_{л})}{I_{л}^2 + I_{п}^2 + 2I_{л}I_{п}\cos(\varphi_{л} - \varphi_{п})}}. \quad (4.22)$$

Розділивши чисельник і знаменник підкореного виразу (4.22) на $I^2_{л}$ та позначивши $\beta = I_{п}/I_{л}$, отримаємо

$$K_{2I} = \sqrt{\frac{1 + \beta^2 + 2\beta\cos(2\theta + \varphi_{п} - \varphi_{л})}{1 + \beta^2 + 2\beta\cos(\varphi_{л} - \varphi_{п})}}. \quad (4.23)$$

Якщо прийняти $\varphi_{п} = \varphi_{л}$, то

$$K_{2I} = \frac{\sqrt{1 + \beta^2 + 2\beta\cos 2\theta}}{1 + \beta}. \quad (4.24)$$

При трифазному трансформаторі $\theta = 60°$, а для схеми відкритого трикутника -60°. Тоді

$$K_{2I} = \frac{\sqrt{1 + \beta^2 - \beta}}{1 + \beta}. \quad (4.25)$$

Для схеми Скотта $\theta = 90°$. Для K_{2I} отримаємо

$$K_{2I} = \frac{1 - \beta}{1 + \beta}. \quad (4.26)$$

Криві зміни значення K_{2I} для різних трансформаторних схем наведені на рис. 4.6.

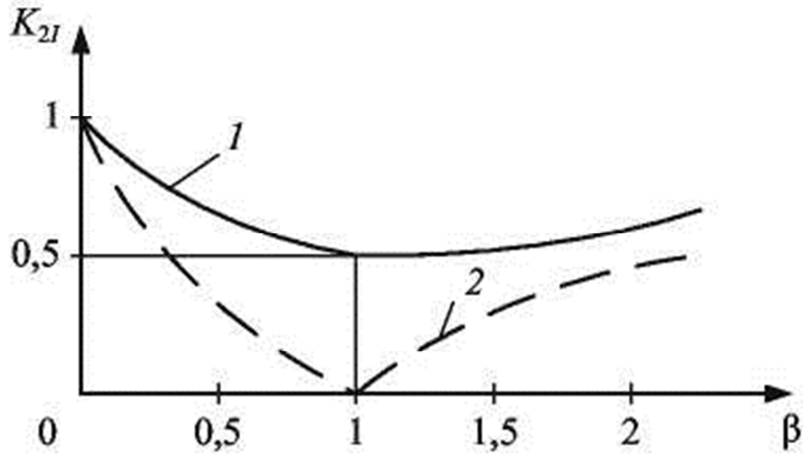


Рис. 4.6. Залежність коефіцієнта несиметрії струмів, створюваної підстанцією, від співвідношення навантажень на плечах живлення:

1 – для трифазного трансформатора і схеми відкритого трикутника; *2* – для схеми Скотта

Використовуючи отримані вирази для трифазного трансформатора (4.20) і (4.21), можна визначити струми прямої і зворотної послідовностей. Повна потужність трифазного ланцюга *S*, що підводиться споживачеві, дорівнює

$$S = 3UI_1, \tag{4.27}$$

де I_1 – діюче значення струму прямої послідовності.

Відповідно амплітуда частини потужності трифазної системи, що коливається A_s''

$$A_s'' = 3UI_2, \tag{4.28}$$

де I_2 – діюче значення струму зворотної послідовності. Звідси ступінь неврівноваженості потужності трифазного ланцюга

$$\alpha_s = \frac{A_s''}{S} = \frac{3UI_2}{3UI_1} = \frac{I_2}{I_1}. \tag{4.29}$$

Прирівнюючи вирази (4.27) і (4.20) і приймаючи, що $\varphi_0' = 1$, отримаємо [3]

$$3I_1 = \sqrt{I_{л}^2 + I_{п}^2 + 2I_{л}I_{п}\cos(\varphi_{л} - \varphi_{п})},$$

Звідки

$$I_1 = \frac{1}{3}\sqrt{I_{л}^2 + I_{п}^2 + 2I_{л}I_{п}\cos(\varphi_{л} - \varphi_{п})}. \qquad (4.30)$$

Прирівнюючи вирази (4.28) і (4.21) та приймаючи $\cos(2\omega t - \varphi''_0) = 1$, визначимо значення струму зворотної послідовності

$$I_2 = \frac{1}{3}\sqrt{I_{л}^2 + I_{п}^2 + 2I_{л}I_{п}\cos(2\theta + \varphi_{п} - \varphi_{л})}. \qquad (4.31)$$

При $\varphi_{п} = \varphi_{л}$

$$I_1 = \frac{1}{3}(I_{л} + I_{п}). \qquad (4.32)$$

$$I_2 = \frac{1}{3}\sqrt{I_{л}^2 + I_{п}^2 + 2I_{л}I_{п}\cos 2\theta}. \qquad (4.33)$$

Для окремого випадку, коли $I_{л} = I_{п} = I$, отримаємо

$$I_1 = \frac{2}{3}I;$$

$$I_2 = \frac{1}{3}I\sqrt{2(1 + \cos 2\theta)}. \qquad (4.34)$$

Для схем з трифазним трансформатором ($\theta = 60°$) і відкритого трикутника ($\theta = -60°$)

$$I_2 = \frac{1}{3} I \,. \qquad (4.35)$$

Для трансформатора Скотта θ = 90°, тому $I_2 = 0$.

У випадку одного однофазного навантаження, коли припустимо $I_л \neq 0$, а $I_п = 0$, з виразів (4.32) і (4.33) отримаємо

$$I_1 = \frac{1}{3} I_л \,,\; I_2 = \frac{1}{3} I_л \,,$$

тобто струми прямої і зворотної послідовності рівні між собою і збігаються по фазі. Взявши відношення I_2 до I_1, отримаємо значення коефіцієнта несиметрії струмів.

4.4 Розрахунок несиметрії струмів та напруг в системі електропостачання тягових підстанцій

Розрахуємо струми прямої і зворотної послідовності та коефіцієнт несиметрії струмів для підстанції, схема підключення якої наведена на рис. 4.7, при $\varphi_п = \varphi_л = 37°$, $I_л = 450$ А, а $I_п = 300$ А.

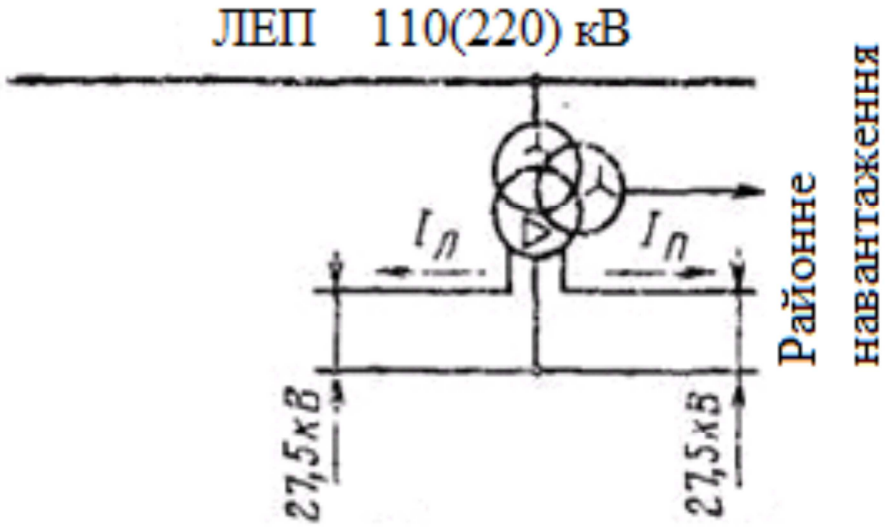


Рис. 4.7. Схема живлення тягової мережі

Вектори струмів плечей живлення:

$$\dot{I}_{\text{л}} = 450\text{e}^{-j37^\circ};$$

$$\dot{I}_{\text{п}} = 300\text{e}^{-j(60^\circ + 37^\circ)} = 300\text{e}^{-j97^\circ}.$$

Вектори струмів прямої і зворотної послідовності за (3.7)

$$\dot{I}_{a1} = 1/3(450\text{e}^{-j37^\circ} - a^2 300\text{e}^{-j97^\circ});$$

$$\dot{I}_{a2} = 1/3(450\text{e}^{-j37^\circ} - a\,300\text{e}^{-j97^\circ}).$$

Враховуючи, що $a = \text{e}^{j120^\circ}$ та $a^2 = \text{e}^{j240^\circ}$, знайдемо:

$$\dot{I}_{a1} = 50(3\text{e}^{-j37^\circ} - 2\text{e}^{-j97^\circ}\text{e}^{j240^\circ}) = 50(3\text{e}^{-j37^\circ} - 2\text{e}^{j143^\circ});$$

$$\dot{I}_{a2} = 50(3\text{e}^{-j37^\circ} - 2\text{e}^{-j97^\circ}\text{e}^{j120^\circ}) = 50(3\text{e}^{-j37^\circ} - 2\text{e}^{j23^\circ}).$$

Так як $-2 = 2\text{e}^{-j180^\circ}$, отримаємо:

$$\dot{I}_{a1} = 50(3\text{e}^{-j37^\circ} + 2\text{e}^{j143^\circ}\text{e}^{-j180^\circ}) = 50(3\text{e}^{-j37^\circ} + 2\text{e}^{-j37^\circ}) = 250\text{e}^{-j37^\circ};$$

$$\dot{I}_{a2} = 50(3\text{e}^{-j37^\circ} + 2\text{e}^{j23^\circ}\,\text{e}^{-j180^\circ}) = 50(3\text{e}^{-j37^\circ} + 2\text{e}^{-j157^\circ}).$$

Визначимо струм оберненої послідовності, розклавши вектори, що знаходяться в дужках на дійсні і уявні складові:

$$3\text{e}^{-j37^\circ} + 2\text{e}^{-j157^\circ} = 3\cos 37^\circ - j3\sin 37^\circ + 2\text{e}^{-j203^\circ} =$$

$$= 3\cdot 0{,}8 - j3\cdot 0{,}6 + 2\cos 203^\circ + j2\sin 203^\circ =$$

$$= 2{,}4 - j1{,}8 - 2\cos 23^\circ - j2\sin 23^\circ = 2{,}4 - j1{,}8 - 2\cdot 0{,}921 - j2\cdot 0{,}391 \approx$$

$$\approx 0{,}56 - j2{,}58 = 2{,}75\text{e}^{-j77^\circ 46'}$$

$$\dot{I}_{a2} = 50\cdot 2{,}75\text{e}^{-j77^\circ 46'} = 137{,}5\text{e}^{-j77^\circ 46'}.$$

Коефіцієнт несиметрії струмів

$$\varepsilon_{I2} = I_{\text{a2}}/I_{\text{a1}} = 137{,}5/250 = 0{,}55.$$

Визначимо коефіцієнт несиметрії напруги на шинах тягового навантаження підстанції №3 (рис. 4.8) при $\varphi_{\text{п}} = \varphi_{\text{л}} = 37^\circ$, $I_{\text{л}} = I_{\text{п}} = 300$ А на всіх підстанціях; відстань ЖЦ та підстанцією №1, підстанціями №1 та 2, а також №2 та 3 дорівнюють 50 км; питомий індуктивний опір лінії електропередачі 110 кВ $x_0 = 0{,}4$ Ом/км та $x_{2\text{T}} = 4$ Ом.

Знайдемо опір ділянок ліній

$$x'_{\text{II-I}} = x'_{\text{III-II}} = 50\cdot 0{,}4 = 20\ \text{Ом}.$$

Перераховуємо цей опір з фазної напруги $110/\sqrt{3}$ кВ до напруги 27,5 кВ

$$x_{\text{II-I}} = x_{\text{III-II}} = x'_{\text{II-I}}(27{,}5\cdot\sqrt{3}/110)^2 = 20(27{,}5\cdot\sqrt{3}/110)^2 = 3{,}75\ \text{Ом}.$$

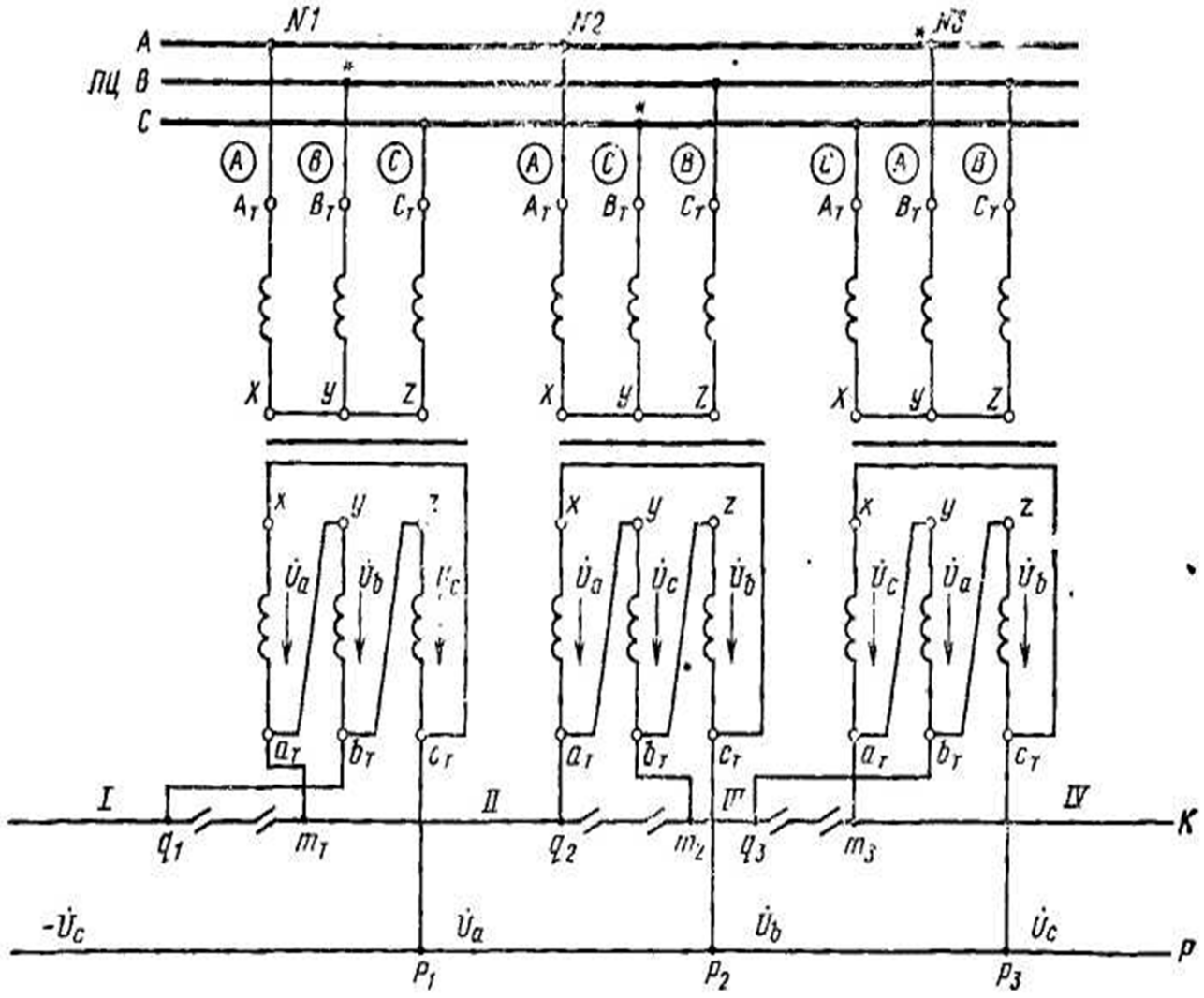


Рис. 4.8. Симетруюче приєднання трансформаторів зі схемою з'єднання Y/Δ-11 трьох підстанцій до загальної лінії живлення при односторонньому живлені підстанцій

К – контактна підвіска; *Р* – ходові рейки; I, II, III, IV – фідерні зони; *ПЦ* – живлячий центр

Струм оберненої послідовності підстанції №1

$$\dot{I}^{\text{I}}_{a2} = 1/3(\dot{I}_{\text{л}} - a\dot{I}_{\text{п}}) = 1/3(300e^{-j37^\circ} - 300e^{-j97^\circ}e^{j120^\circ}) =$$

$$= 100(e^{-j37^\circ} + e^{-j97^\circ}e^{j120^\circ}e^{j180^\circ}) = 100(0{,}8 - j0{,}6 + \cos 203^\circ + j\sin 203^\circ) =$$

$$= 100(0{,}8 - j0{,}6 - 0{,}921 - j0{,}391) = 100(-0{,}121 - j0{,}991) \approx 100e^{-j97^\circ}.$$

Струм оберненої послідовності на ділянці II–I

$$\dot{I}^{\text{III-II}}_{a2} = \dot{I}^{\text{III}}_{a2} + \dot{I}^{\text{II}}_{a2}.$$

У відповідності з рис. 4.7 маємо:

$$\dot{I}^{\text{I}}_{a2} = \dot{I}^{\text{II}}_{a2}a^2 = 100\ e^{-j97^\circ}e^{j240^\circ} = 100e^{j143^\circ};$$

$$\dot{I}^{\text{II}}_{a2} = \dot{I}^{\text{I}}_{a2}a = 100\ \text{e}^{-j97^\circ}\text{e}^{j120^\circ} = 100\text{e}^{j23^\circ}.$$

Звідки отримаємо:

$$\dot{I}^{\text{III-II}}_{a2} = 100\text{e}^{j143^\circ} + 100\text{e}^{j23^\circ} = 100\text{e}^{j83^\circ}.$$

Напруга оберненої послідовності на шинах підстанції №3

$$\acute{U}^{\text{III}}_{a2} = -jx_{\text{II-I}}\dot{I}^{\text{III-II}}_{a2} - j(x_{\text{III-II}} + x_{2\text{т}})\dot{I}^{\text{III}}_{a2} =$$

$$= -j3{,}75\cdot 100\text{e}^{j83^\circ} - j(3{,}75 + 4)100\text{e}^{j143^\circ} = -j375\text{e}^{j83^\circ} - j775\text{e}^{j143^\circ} =$$

$$= 375\text{e}^{-j7^\circ} + 775\text{e}^{j53^\circ} = 375\cos 7^\circ - j375\sin 7^\circ + 775\cos 53^\circ + j775\sin 53^\circ =$$

$$= 375\cdot 0{,}993 - j375\cdot 0{,}122 + 775\cdot 0{,}602 + j775\cdot 0{,}799 =$$

$$= 372 - j46 + 467 + j619 = 839 + j573 = 1016\ \text{e}^{j34^\circ 20'}.$$

Коефіцієнт несиметрії напруги

$$\varepsilon_{U2} = 100\ U^{\text{III}}_{a2}/U_{\text{H}} = 100\cdot 1016/27500 = 3{,}69\ \%.$$

РОЗДІЛ 5
ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1 Причини нещасних випадків на виробництві та заходи захисту від них

Техніка безпеки – це система організованих і технічних заходів і засобів, що запобігають вплив на працюючих небезпечних виробничих факторів, що призводять до травми.

При експлуатації електроустановок людина може опинитися в зоні дії електромагнітного поля або в безпосередньому зіткненні з струмоведучими частинами, в результаті чого по його тілу буде протікати електричний струм.

Небезпечна зона – це простір, в якому постійно діють або періодично виникають фактори, небезпечні для життя і здоров'я людини. Небезпечні зони виникають: навколо відкритих, доступних для дотику струмоведучих частин; простору переміщення або обертання різних частин машин і механізмів; в місцях дії небезпечних для життя і здоров'я людини випромінювань (радіоактивних, теплових, електромагнітних); в межах неогороджених робочих місць, розташованих на висоті або поблизу залізничного рухомого складу, що рухається.

Нещасні випадки на виробництві викликаються:

технічними причинами – конструктивні недоліки обладнання або окремих його вузлів (відсутність блокувань і інших засобів безпеки); недосконаліть технологічного процесу експлуатаційного обслуговування; недосконаліть або відсутність захисних або запобіжних пристроїв;

організаційними причинами – порушенням технологічного процесу; неправильною організацією праці (порушення режиму роботи); неправильним плануванням обладнання і організацією робочих місць; використання невідповідного обладнання, пристосувань до інструменту; відсутність керівництва і нагляду за виконанням робіт; залучення до робіт не за фахом, застосування небезпечних прийомів роботи, неузгодженість дій працюючих, недостатня навченість безпечним прийомам праці; відсутність або незадовільна якість індивідуальних засобів захисту працюючих;

санітарно-гігієнічними причинами – ненормальні метеорологічні умови (температура, вологість, швидкість руху повітря, теплові випромінювання); нераціональне освітлення; забрудненість повітряного середовища; шум і вібрація; шкідливі випромінювання (радіоактивні, електромагнітні, ультрафіолетові); обмеженість виробничих приміщень; порушення правил особистої гігієни та антисанітарний стан виробничих і побутових приміщень; незадовільний медичний нагляд або відсутність його.

Нещасний випадок може бути результатом не однієї, а кількох причин, які встановлюються при розслідуванні і розкриваються при аналізі травматизму. Існують статистичний і технічний методи вивчення травматизму. При статистичному методі проводять порівняльний аналіз коефіцієнтів частоти, тяжкості і втрат від нещасних випадків. В основу технічного методу покладені монографічний, груповий і топографічний способи вивчення травматизму.

При експлуатаційному обслуговуванні діючих електроустановок, виконанні налагоджувальних робіт і випробувань, проведенні необхідних переключень роз'єднувачів і вимикачів слід строго виконувати організаційні та технічні заходи і використовувати технічні засоби для попередження ураження електричним струмом та запобігання впливу інших небезпечних виробничих факторів (наїзди, падіння з висоти).

До організаційних заходів відносяться: оформлення робіт нарядом або розпорядженням; інструктаж на місці робіт; допуск до робіт; нагляд під час робіт; оформлення перерви в роботах, переходу на інше робоче місце, закінчення робіт.

До технічних заходів належать: проведення відключень; вивішування плакатів та установка огороджень; приєднання до «землі» (тяговій рейці) переносних заземлень і перевірка відсутності напруги на струмопровідних частинах; накладення заземлення; установка стаціонарних (на дрезинах, автомотрисах, знімних ізолюючих вишках), переносних шунтуючих штанг і спеціальних шунтів при роботах під напругою: огородження робочого місця.

Основними технічними засобами захисту працюючих, які забезпечують попередження ураження електричним струмом та запобігання впливу інших

небезпечних виробничих факторів, є: захисне заземлення та занулення металевих частин електроустановок, які нормально не знаходяться під напругою; ізоляція струмоведучих частин; вирівнювання потенціалів і створення еквіпотенційних умов на основному робочому місці; захисне відключення; огорожу і блокування; застосування зниженої напруги і підвищеної частоти для електроустановок; індивідуальні засоби захисту.

Обсяг і зміст організаційних і технічних заходів, що застосовуються засоби захисту працюючих визначаються наступним: категорією виконуваної роботи (при повному або частковому знятті напруги, без зняття напруги на струмопровідних частинах або інакше під напругою, без зняття напруги поблизу чи далеко від частин, що знаходяться під напругою); робочою напругою установки (до 1000 В і вище 1000 В) і навколишнього виробничого середовища (виробничі приміщення з підвищеною небезпекою, особливо небезпечні і без підвищеної небезпеки).

До обслуговування електроустановок допускаються працівники не молодше 18 років, що пройшли медичний огляд, навчання безпечним методам роботи і перевірку знання Правил техніки безпеки і додаткових інструкцій, що діють на підприємстві, стосовно привласнюється кваліфікаційній групі з техніки безпеки. Встановлено п'ять кваліфікаційних груп. Чим вище група, тим більші вимоги пред'являються до працівника.

5.2 Заземлення трансформаторних підстанцій споживачів, що живляться від тягових мереж

Заземлення трансформаторних підстанцій, що живляться від системи «два дроти-рейки»

Однофазні комплектні трансформаторні підстанції (КТПО). Робоче і захисне заземлення (рис. 5.1) КТПО потужністю до 10 кВА об'єднують в одному контурі, що має опір розтіканню $R_з \leq 5$ Ом. Однополюсний роз'єднувач РЛНД-35 і запобіжник ПКТ-35Н встановлюють на опорі контактної мережі, заземленою на тягові рейки або на окремо розташованих опорах, заземленою на самостійний

контур. Опір розтіканню цього контуру $R_з \leq 10$ Ом, якщо ρ <100 Ом·м; $R_з \leq 15$Ом, якщо 100 Ом·м <ρ ≤500 Ом·м; $R_з \leq 20$ Ом, якщо 500 Ом·м <ρ ≤1000 Ом·м і $R_з \leq 30$ Ом, якщо ρ> 1000 Ом·м.

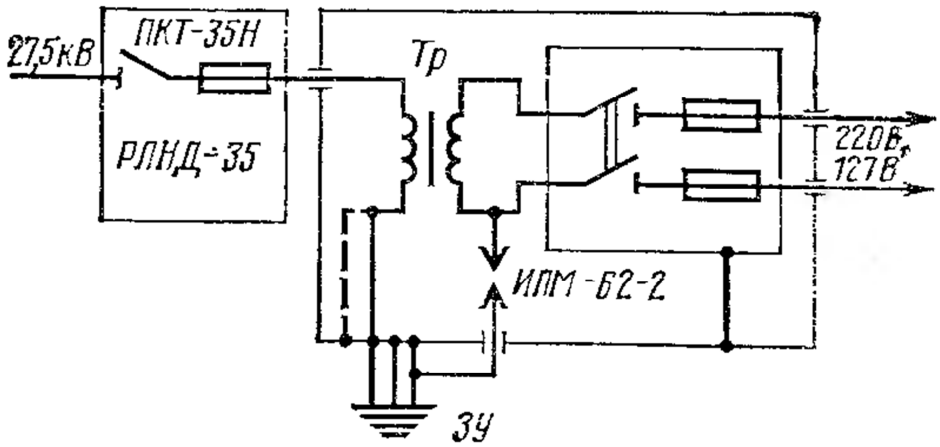


Рис. 5.1. Схема заземлення однофазної трансформаторної підстанції

Первинну обмотку трансформатора Тр з'єднують з контуром заземлення ЗУ (робоче заземлення), а також з кожухом трансформатора наглухо, не встановлюючи роз'єднувач. Виконують також захисне заземлення, для чого кожух трансформатора, фланці ізоляторів, кожух розподільної шафи і інші металеві конструкції приєднують до металевої конструкції КТПО, з'єднаної з контуром заземлення двома окремими провідниками.

З контуром заземлення через запобіжник типу ІПМ-62-2 з пробивною напругою 400÷800 В з'єднують один з виводів вторинної обмотки трансформатора [8].

Трифазні трансформаторні підстанції (ТП) потужністю до 25 кВА включно. Робоче і захисне заземлення ТП (рис. 5.2) об'єднують в одному контурі з $R_з \leq 5$ Ом. Перевантаження трансформатора понад номінал заборонене. Двополюсний роз'єднувач і запобіжники ПКТ-35Н встановлюють так само, як в схемі заземлення КПТО, дотримуючись співвідношення $R_з$ і ρ.

З контуром заземлення ТП через запобіжник ІПМ-62-2 з'єднують нульовий вивід вторинної обмотки трансформатора. Якщо неможливо забезпечити $R_з = 5$ Ом, заземлення виконують відповідно до вимог, що представляються до ТП потужністю вище 25 кВА.

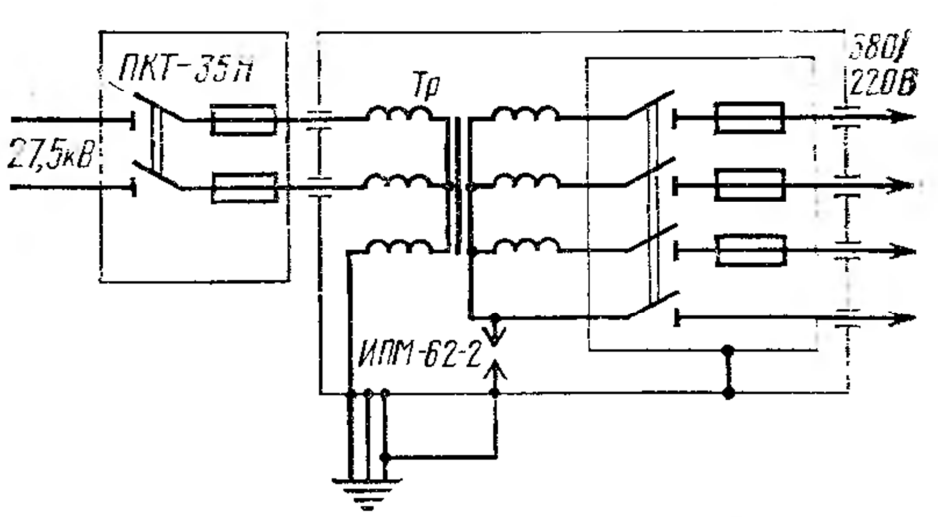


Рис. 5.2. Схема заземлення тифазної трансформаторної підстанції потужністю до 25 кВА

Заземлення пересувних електростанцій і підстанцій

На залізничному транспорті для виробничих потреб в основному застосовується електрична мережа з заземленою нейтраллю. Для таких мереж обов'язково металеве з'єднання обладнання, що підлягає заземленню, з заземленою нейтраллю джерела живлення.

З цією метою використовують нульовий провід мережі або в окремих випадках спеціальні заземлюючі провідники. Нульовий провід, застосовуваний для заземлення електрообладнання пересувних електроустановок, розташований в спільній оболонці з фазними і має однаковий з ними перетин. Мінімальні перетини заземлюючої жили і багатожильних проводів становлять 1 мм^2 (в разі виготовлення з міді) і 1,5 мм^2 (з алюмінію). Забороняється в якості заземлюючого використовувати нульовий робочий провід.

Для запобігання ураження струмом в пересувних установках з заземленою нейтраллю застосовують захисні автоматичні пристрої, що вимикають типу ІЕ-980; обов'язково спорудження штучного заземлювального пристрою.

Штучні заземлювачі виконують зі сталевих труб діаметром 50 мм з товщиною стінок не менше 3,5 мм, з кутової сталі 50×50 мм або 60×60 мм з товщиною полиць не менше 4 мм. Заземлювачі влаштовують на відстані не

ближче 2 м від крайньої рейки, закладаючи їх на глибину не менше 1 м. Забороняється забивати заземлювачі в баластну призму. Застосовують і спеціальні переносні інвентарні заземлювачі (бурава). Вони виконуються з металевих стрижнів довжиною 0,8-1,0 м у вигляді наборів в кількості 10-20 шт. Стрижні міцно з'єднують гнучким мідним провідником перерізом не менше 25 мм^2. Для установки такого заземлювача в грунт середньої щільності в літню пору потрібно 3-5 хв., а для вилучення 3-4 хв. Можна застосовувати металеві стрижні діаметром d = 25 мм і довжиною l = 0,8 м з одним загостреним кінцем. Маса заземлювача 3,2 кг; час на установку 1-2 хв., а на витяг 1 хв.

Монтаж заземлювачів

Заземлювачі споруджують відповідно до проекту. ПУЕ, будівельними нормами, правилами та інструкціями монтажних організацій. Застосовувані для укладання в землю електроди і сполучні провідники повинні бути очищені від продуктів корозії, масла і т. п. Вертикальні електроди забивають в дно траншей глибиною 0,7-0,8 м. Верхній кінець електрода повинен виступати над дном на висоту 0,1 -0,2 м. Занурення вертикальних електродів проводиться механізованим способом за допомогою копрів, вібраторів, гідропресів, методом вкручування (при стрижневих електродах).

Горизонтальні електроди прокладаються по дну траншеї на глибині 0,5-0,8 м. Прокладка на меншій глибині виконується в місцях приєднань до обладнання і в скельних ґрунтах. Електроди з смугової сталі прокладають, встановлюючи на ребро.

З'єднання заземлювачів з заземлюючими провідниками виконують електрозварюванням. При відсутності електрозварювального устаткування може застосовуватися термітне зварювання. Якість зварних з'єднань визначається оглядом, а міцність - завдаючи ударів молотком масою 1 кг.

У місцях перетину горизонтальних електродів з підземними спорудами (трубопроводи, кабелі та ін.), При перетині доріг і в інших місцях, де можливі механічні пошкодження, горизонтальні електроди захищають металевими або азбоцементними трубами.

Траншеї з укладеними в них електродами слід засипати землею, яка не містить каменів і будівельного сміття, і щільно утрамбовувати землю. Перед засипанням траншей перевіряють якість з'єднань і складають акт за встановленою формою на приховані роботи.

Розрахунок заземлення.

ТП напругою 10/0,4 кВ на стороні 0,4 кВ мають глухозаземлену нейтраль. Обмотки трансформатора з'єднані - Δ/Y з нулем. Струм замикання в мережі 10 кВ на землю 27 А. Споживачі підстанції отримують живлення від 2 кабелів, що прокладені в одній траншеї.

Грунт – супісь, II кліматичний район.

Визначається норма на опір заземлення $R_з^н$.

Якщо заземлюючий пристрій використовується одночасно для електроустановок напругою до 1000 В та вище:

$$R_з \le \frac{125}{I_з} = \frac{125}{27} = 4{,}63 \text{ Ом};$$

Так як сумарна потужність струмоприймачів > 100 кВА то $R_з$ повен бути < 4 Ом. Приймається $R_з$ = 4 Ом.

Розрахунковий питомий опір ґрунту:

$$\rho_р = \rho_{табл} \cdot \psi = 250 \cdot 1{,}4 = 350 \text{ Ом} \cdot \text{м},$$

де $\rho_{табл}$ – табличне значення, для супіску $\rho_{табл}$ =250 Ом·м (табл. 3.8 [9]);

ψ – підвищуючий коефіцієнт, для України, для стержньових заземлювачів ψ =1,4. (табл. 3.10 [9]).

Опір одинарного вертикального заземлювача:

$$R_о = 0{,}366\frac{\rho_{розр}}{l}\left(\lg\frac{2l}{d} + \frac{1}{2}\lg\frac{4t+l}{4t-l}\right) =$$

$$= 0.366\frac{350}{5}\left(\lg\frac{2\cdot 5}{2.5} + \frac{1}{2}\lg\frac{4\cdot 3+5}{4\cdot 3-5}\right) = 20{,}361 \text{ Ом},$$

де l – його довжина, приймається 5 м; d – діаметр заземлювача (приймаються стрижні діаметром 2,5 см).

$$t = h + \frac{l}{2} = 0{,}5 + \frac{5}{2} = 3 \text{ м},$$

де h – глибина прокладки смуг (згідно ПУЕ – 0,5...0,8 м).

Електроди прокладені по замкнутому контуру згідно плану та визначається орієнтовна кількість заземлювачів:

$$n_o = \frac{R_o}{R_з^н \cdot \eta_t} = \frac{20{,}361}{4 \cdot 0{,}59} = 8{,}628 \approx 9 \text{ шт},$$

де η_o – коефіцієнт використання ряду заземлювачів, для a/l=4/5=0.8, η_o =0,59 за рис. 7.5 [9].

Довжина горизонтальної з'єднувальної смуги:

$$l_n = 1{,}05a \cdot n = 1{,}05 \cdot 4 \cdot 9 = 37{,}8 \text{ м}.$$

де a = 4 м – відстань між електродами згідно ПУЕ.

Опір смуги з урахуванням екранування:

$$R_n = 0{,}366 \frac{\rho_{розр}}{l_n \cdot \eta_n} \lg \frac{2l_n}{b \cdot n} = 0{,}366 \frac{350}{37{,}8 \cdot 0{,}59} \lg \frac{2 \cdot 37{,}8^2}{0{,}01 \cdot 0{,}5} = 24 \text{ Ом},$$

де η_n – коефіцієнт використання з'єднувальної смуги шириною b = 10 мм та товщиною 5 мм.

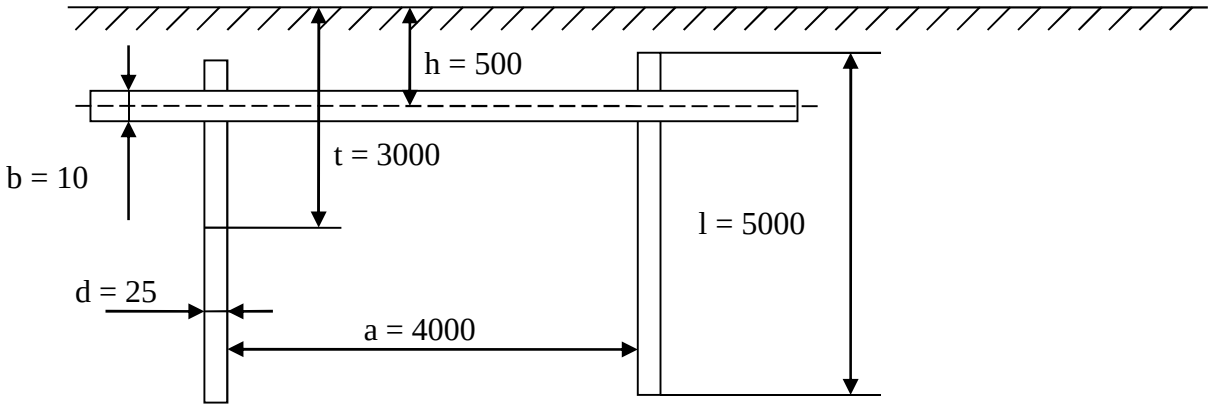


Рис. 5.3. Схема прокладки заземлення

Необхідний опір вертикальних заземлювачів з урахуванням опору з'єднувальної смуги:

$$R_{тр} = \frac{R_п \cdot R_з^н}{R_п \cdot R_з^н} = \frac{24 \cdot 4}{24 - 4} = 4{,}8 \text{ Ом.}$$

Остаточна кількість заземлювачів:

$$n = \frac{R_о}{R_{тр} \cdot \eta_о} = \frac{20{,}361}{4{,}8 \cdot 0{,}59} = 7{,}49 \approx 8 \text{ шт.}$$

Проводиться перевірка опору заземлювача та порівнюється отримане значення з нормою:

$$R_з = \frac{1}{\frac{1}{R_{тр}} + \frac{1}{R_п}} = \frac{1}{\frac{1}{4{,}8} + \frac{1}{24}} = 4 \text{ Ом.}$$

Дійсний опір заземлюючого пристрою з 8-ма заземлювачами не перевищує нормованого значення.

5.3 Основні організаційно-технічні заходи з техніки безпеки

Оформлення робіт. Всі планові експлуатаційні роботи виконуються за нарядом або, в окремих випадках, за усним розпорядженням. Наряд – це письмове розпорядження, що визначає категорію і характер роботи, місце, час і умови її безпечного проведення, кваліфікаційний склад бригади і осіб (керівник робіт і наглядач), відповідальних за точне дотримання правил техніки безпеки і спеціальних приписів, зазначених у наряді. В процесі роботи заборонено змінювати її категорію і кордони без виписки нового наряду або користуватися вантажопідйомними механізмами, які не зазначені в наряді.

В аварійних випадках роботи дозволено виконувати без наряду. Кваліфікація керівника при цьому повинна відповідати категорії виконуваної роботи (на контактній мережі - група не нижче V).

Без наряду можна виконувати деякі прості роботи, які не вимагають здійснення комплексу організаційно-технічних заходів.

Допуск до робіт. Проводиться після підготовки місця роботи, що перевіряє відповідальний керівник і виконувач роботи спільно з допускаючим. На контактної мережі допуск здійснює керівник роботи після отримання наказу

енергодиспетчера і перевірки виконання всіх необхідних технічних заходів. Допускаючий перевіряє склад бригади, зачитує основні пункти наряду, проводить інструктаж на місці робіт, показує бригаді приєднання, що залишаються під напругою і т. п., демонструє відсутність напруги, показуючи накладені заземлення (при напрузі понад 35 кВ) або торкаючись струмоведучих частин рукою після перевірки відсутності напруги покажчиком або штангою.

Нагляд під час робіт. Його виконують виконавець (керівник) робіт або спостерігач, які повинні весь час перебувати на місці роботи. У разі їх відлучки бригада виводиться з місця роботи. Кваліфікаційна група спостерігача залежить від категорії робіт і напруги електроустановки, контактної мережі і ЛЕП.

Перерви робіт, перехід на інше робоче місце і закінчення робіт. У цих випадках потрібна підвищена увага, контроль з боку виконавця (керівника), який спостерігає і допускає за всією бригадою і кожним її членом. Напруга може бути подана після виведення всієї бригади з місця роботи, перевірки закінчення роботи і стану обладнання, зняття заземлень і плакатів.

Якщо при виконанні роботи по наряду сталася аварія або електротравма, то наряд необхідно зберігати в архіві підприємства.

Проведення відключень. Вони виконуються роз'єднувачами, віддільниками або вимикачами навантаження, що не мають автоматичного приводу на включення, зняттям запобіжників, від'єднанням або зняттям шин або проводів (шлейфів). При цьому з кожного боку від місця роботи повинен бути видимий (відкритий) розрив. З метою забезпечення безпеки приводи замикають в відключеному положенні висячим або блокувальним замком, а при дистанційному управлінні видаляють запобіжники на всіх полюсах.

Вивішування попереджувальних плакатів, установка огорож і видача попереджень. Це виконують з метою виключення подачі напруги на місце роботи. На ключах управління, рукоятках і кнопках приводів, на підставах запобіжників вивішують плакати «Не включати - працюють люди»; «Не включати - робота на лінії» і т. п.

Щоб не допускати перекриття ізолюючих сполучень або секційних ізоляторів струмоприймачами електрорухомого складу і подачі тим самим напруги в контактну мережу, стрілки і з'їзди на станціях або окремі ділянки шляху закриваються для руху. Це здійснюється за наказом поїзного диспетчера черговими відповідних станцій по заявці енергодиспетчера. У ряді випадків (при відсутності зв'язку з енергодиспетчером) керівник робіт сам вживає всіх заходів до огорожі зони робіт і забезпечення безпеки працюючих.

Ізолюючі знімні вишки для робіт під напругою на контактній мережі захищаються так, як зазначено в Інструкції щодо забезпечення безпеки руху поїздів під час виконання робіт на контактній мережі з ізолюючих знімних вишок. При роботі зі знімною ізолюючої вишкою в умовах поганої видимості на поїзді повинні також видаватися попередження про особливу пильність і, при необхідності, подачі сигналів в зоні роботи бригади з ізолюючої знімною вишкою порядком.

Перевірка відсутності напруги і накладення заземлення. Перевірка відсутності напруги виконується для електроустановок напругою до 110 кВ включно з допомогою попередньо перевіреного покажчика напруги. Для електроустановок напругою 35÷220 кВ в суху погоду дозволяється виконувати спеціальною ізолюючої штангою перевірку «на іскру і потріскування». Відсутність напруги в контактній мережі постійного струму напругою 3,3 кВ і змінного струму 27,5 кВ перевіряють, торкаючись неструмоведучих елементів, що знаходяться під напругою, спеціальним вістрям заземлюючої штанги, прикріпивши її попередньо до заземлювача (рейки) або приладом дистанційного контролю.

Накладення і зняття заземлень в установках напругою понад 1000 В повинні виконувати дві особи. В установках до 1000 В накладати і знімати заземлення, а також включати і вимикати заземлювальні ножі може одна людина. Надійне і за правилами виконане заземлення - основний захід захисту як від робочого, так і від наведеної напруги. Заземленням знімається також з ліній залишковий електричний заряд.

З метою дотримання послідовності накладення заземлення штанги для контактної мережі повинні мати блокування. Розташування штанг і їх кількість залежать від роду струму контактної мережі, характеру роботи, місця роботи, а також від характеристики відключає обладнання.

Установка шунтуючих штанг і спеціальних шунтів при роботі під напругою. Це виконується з метою створення в зоні роботи еквіпотенційних умов при нормальному режимі роботи і в аварійних випадках (пробою ізоляції ізолюючого захисного засобу і ізоляції електроустановок, контактної мережі і т. п.).

Розрахунок блискавкозахисту

Небезпечним при появі блискавки є прямий удар. Число уражень блискавкою в рік будівель та споруд висотою не більше 60 м та не обладнаних грозозахистом, визначають за формулою:

$$N = (B + 6h_x)(L + 6h_x)n \cdot 10^{-6},$$

де B – ширина об’єкту, який захищається, м;

L – довжина об’єкту, який захищається, м;

h_x – висота об’єкту по бокам, м;

n – середнє число уражень блискавкою на 1 км^2 земної поверхні у рік, табл. 12.2 [9].

З табл. 12.3 [9] приймається, що захисна зона типу Б категорії грозозахисту III. При інтенсивності грозової діяльності 60-80 год/рік приймається n = 9 (табл.12.2 [9]) та B = 36 м; L = 90 м; h_x = 11 м:

$$N = (36 + 6\times11)(90 + 6\times11)9\times10^{-6} = 0{,}143$$

Захист виконаємо двома окремими металевими грозовідводами з висотою h = 50 м на відстані один від одного l = 110 м.

Для зони Б при l > 1,5h (110м > 75м) розміри зони захисту обчислемо (рис. 5.4.) за формулами:

$$r_0 = 1{,}5h = 1{,}5\times50 = 75 \text{ м}$$

$$r_x = 1{,}5\times\left(h - \frac{h_x}{0{,}92}\right) = 1{,}5\times\left(50 - \frac{11}{0{,}92}\right) = 57{,}065 \text{ м}$$

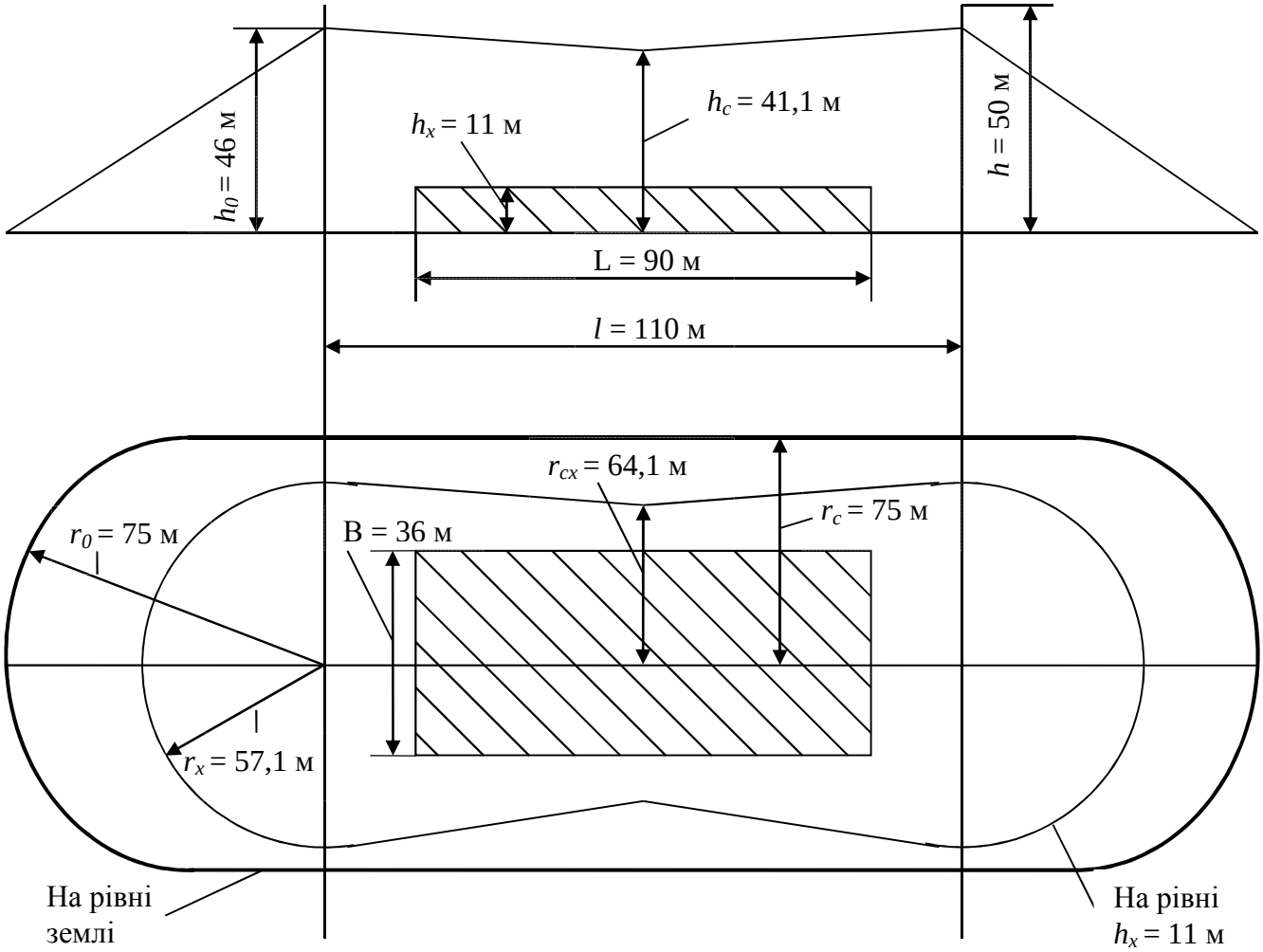


Рис. 5.4. Зони захисту грозозахисту.

$$h_0 = 0{,}92h = 0{,}92\times 50 = 46 \text{ м};$$

$$h_c = h_0 - 0{,}14(l - 1{,}5h) = 46 - 0{,}14(110 - 1{,}5\times 50) = 41{,}1 \text{ м};$$

$$r_{cx} = r_0 \frac{h_c - h_x}{h_c} = 75\frac{41{,}1 - 6}{41{,}1} = 64{,}051 \text{ м}, \; r_c = r_0 = 75 \text{ м}.$$

За отриманими значеннями побудуємо зони захисту даного об’єкту для різних рівнів (рис. 5.4).

ВИСНОВКИ

В даній кваліфікаційній роботі за другим (магістерським) рівнем вищої освіти проведений аналіз способів та заходів зі зниження впливу несиметрії напруг і струмів тягових навантажень.

Підсумовуючи результати кваліфікаційної роботи можна зробити наступні висновки, що до розробки заходів зі зниження несиметрії напруг та струмів від тягових навантажень.

1. Електротехнічна система електричної тяги однофазного змінного струму 25 кВ, 50 Гц за своєю специфікою здійснює несиметричний відбір електричної енергії з трьохфазної енергосистеми. Внаслідок цього зовнішня система трьохфазного електропостачання навантажується несиметричними фазними струмами, що призводить до виникнення несиметрії напруги в електричний мережі енергосистеми.

2. Несиметрія струмів призводить до наступних негативних наслідків:

– збільшення втрат електричної енергії в системі електропостачання через нерівномірність завантаження фаз;

– зменшення пропускної здатності ліній електропередач;

– недовикористання потужностей трансформаторів і генераторів;

– додаткового нагрівання обмоток електродвигунів і генераторів;

– виникнення несиметрії напруги у вузлах мережі.

3. Несиметрія напруги призводить до наступних негативних наслідків:

– зниження потужності електродвигунів;

– виникнення вібрації і шумів в електричних машинах;

– підвищеного нагрівання трансформаторів, а, отже, і скорочення терміну їх служби;

– нестійкої роботи частотних перетворювачів електроприводів.

4. Несиметрію напруг, обумовлену несиметричними електроприймачами, можна обмежити до прийнятних значень, як за допомогою схемних рішень, так і шляхом застосування спеціальних симетрувальних пристроїв.

5. Найбільш поширеними підстанціями для живлення однофазних тягових споживачів змінного струму є підстанції з використанням двох однофазних трансформаторів з з'єднанням у розімкнутий трикутник або одного трьохфазного трансформатора зі схемою з'єднання обмоток «зірка-трикутник».

6. Для тягових споживачів в якості схемних рішень використовується схеми «гвинта» при односторонньому живлені або «зустрічного гвинта» при двосторонньому живленні. Відповідно для повного циклу приєднання потрібні три та шість тягових підстанцій відповідно. Дане схемне рішення забезпечує повне симетрування при однаковому навантажені плечей кожної тягової підстанції. Недоліком схемних рішень симетрування є необхідність прокладання окремої ЛЕП для живлення тягових підстанцій відстанню 90-120 км для схеми «гвинта» та 180-240 км для схеми «зустрічного гвинта».

7. Заходом зі зниження несиметрії струмів та напруг є використання на тягових підстанціях схеми Скотта. Такий симетрувальний пристрій дозволяє при симетричному завантаженні плечей повністю виключити несиметрію. Ефект симетрування досягається шляхом отримання напруги, що подається на плечі живлення зсунутої на 90°.

8. Способом зниження несиметрії є використання спеціального симетруючого трансформатора на опорній підстанції. На вторинній стороні трансформатор має 5 виводів з трьома класами напруг. Зсув фаз між напругами складає 90°, чим досягається ефект симетрування. Вздовж залізничної дороги прокладаються два додаткових дроти, що утворюють подовжню лінію електропостачання. На перший з них подається напруга 66,4 кВ, на другий – 27,5 кВ. Від опорної підстанції отримує живлення контактна мережа на 27,5 кВ і поздовжні лінії електропостачання на 93,9 кВ. Від лінії поздовжнього електропостачання живляться проміжні тягові підстанції з однофазними трансформаторами потужністю 16 (25) МВА з відстанями між ними 30-45 км. Відстань між опорними тяговими підстанціями, що мають вихід в мережу загального призначення, становить 300-350 км.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Правила технічної експлуатації залізниць України. Затверджені наказом Міністерства транспорту України від 20 грудня 1996 р. №411. Зі змінами, внесеними згідно з Наказами Мінтрансу №226 від 08.06.98 р., №386 від 23.07.99 р. №179 від 19.03.2002 р., № 962 від 10.12.2003 р. [Електрон. документ] Режим доступу: http://zakon4.rada.gov.ua/ laws/show/z0050-97.

2. Правила улаштування системи тягового електропостачання залізниць України. № 1010-ЦЗ [Текст]. – К., 2004. – 82 с.

3. Проектування систем електропостачання залізниць: Навч. посібник / М. М. Бабаєв, В. С. Блиндюк, О. Д. Супрун та ін.; за ред. М. М. Бабаєва. – Харків: УкрДУЗТ, 2019. – 291 с.

4. Електричні машини і трансформатори: навч. посібник /Осташевський М.О., Юр'єва О.Ю.; за ред. д-ра техн. наук, проф. В.І.Мілих. – К.: Каравела, 2018.- 452с.

5. Сиченко В.Г. Якість електричної енергії у тягових мережах електрифікованих залізниць : монографія / В.Г. Сиченко, Ю.Л. Саєнко, Д.О. Босий. – Д.: Стандарт-Сервіс, 2015. – 340 с.

6. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.

7. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності: ДСТУ EN 50160:2014 (EN 50160:2010, IDT). [Чинний з 1.10.2014]. - К.: Держстандарт України, 2014. – 27 с.

8. Справочник по электроснабжению железных дорог [Текст]: В 2 т. Т. 1 / под ред. К. Г. Марквардта. – М.: Транспорт, 1981. – 391 с. : ил.

9. Ворожбіян М.І., Козодой Д.С., Абакумов О.А., Гармаш Б.К. Актуальні питання охорони праці на залізничному транспорті. Харків: УкрДАЗТ, 2010. 208 с.

10. Правила улаштування електроустановок. - Видання офіційне. Міненерговугілля України. - Х. : Видпнмицтно «Форт*, 2017. - 760 с.

11. Інструкція з технічного обслуговування і ремонту обладнання тягових підстанцій, пунктів живлення і секціонування електрифікованих залізниць [Текст]. – К.: Укразалізниця, 2008. – 125 с.

12. Інструкція з технічного обслуговування і ремонту обладнання тягових підстанцій, пунктів живлення і секціонування електрифікованих залізниць. – Київ : Інпрес, 2008. – 125 с.