



ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
Факультет автоматизації виробництва та цифрових технологій
Кафедра автоматизації, електро- та робототехнічних систем

«Допущено до захисту»
Гарант ОПП

Віктор ХІЛОВ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня магістра

за підсумками виконання освітньо-професійної програми
«Енергоефективні технології в системах електрозабезпечення гірничих
та металургійних підприємств»
за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

**на тему «Забезпечення нормованих показників якості напруги в
системі електропостачання тягового рухомого складу»**

Керівник роботи
Консультант від
бази практики

Юрій ПАПАЙКА
Віктор СУЧКОВ

*Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень та напрацювань.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на
відповідне джерело. Електронний та паперовий варіанти роботи є ідентичними.*

Здобувач

Віктор СКРИПНІЧЕНКО

Підсумкова оцінка за атестацію			
--------------------------------	--	--	--

Голова ЕК

Олексій ВЕРЕЩАК

Запоріжжя 2026

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

Факультет	автоматизації виробництва та цифрових технологій
Кафедра	автоматизації, електро- та робототехнічних систем
Ступінь вищої освіти	магістр
Спеціальність	141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
ОПП	Енергоефективні технології в системах електрозабезпечення гірничих та металургійних підприємств

ЗАТВЕРДЖУЮ

Гарант ОПП

Віктор ХІЛОВ

08.12.2025 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Скрипніченко Віктора Олеговича

1. Тема роботи: «Забезпечення нормованих показників якості напруги в системі електропостачання тягового рухомого складу»

керівник роботи Папаїка Юрій Анатолійович, професор, доктор технічних наук,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Університету від 10.09.2025 р. №239/10.09.2025

2. Термін подання роботи 08.01.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи Навчальна література, діючі стандарти на якість напруги, методики з розрахунків показників якості напруги, методична література з спеціальних дисциплін та дипломування, науково-дослідницькі роботи, літературні джерела, технологічні інструкції, однолінійні схеми електропостачання підприємства, відомості про джерела електромагнітних завад, результати власних експериментів та досліджень тощо.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань) Анотація. Зміст. Вступ. 1. Аналіз предметної області (літературний огляд, причини погіршення якості напруги, сучасні тенденції Smart Grid). Постановка задач з підвищення якості напруги шляхом впровадження FACTS-пристроїв. 2. Реалізація запропонованого підходу (2.1. Розрахунки показників якості напруги у системі живлення тягового рухомого складу. 2.2. Розрахунок та вибір параметрів корегуючих пристроїв. 2.3. Дослідження змін показників якості на математичній моделі. 3. Економічне обґрунтування заходів нормалізації якості напруги. Висновки. Перелік використаних джерел. Додатки.

4. Перелік графічного (демонстраційного) матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Однолінійна принципова схема електропостачання. Схема заміщення для розрахунків показників якості напруги. Розрахунки параметрів ФКУ та/або активних фільтрів. Результати нормалізації показників якості.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи, що стосуються їх.

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта
Аналіз типових джерел електромагнітних завад. Негативний вплив на систему електропостачання Постановка задач дослідження.	Професор кафедри АВЕРС, Папаїка Ю.А.
Реалізація запропонованих заходів з нормалізації якості напруги	Професор кафедри АВЕРС, Папаїка Ю.А.
Економічне обґрунтування запропонованих рішень	Професор кафедри АВЕРС, Папаїка Ю.А.

6. Дата видачі завдання 08.12.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи
1	1. Аналіз предметної області. Постановка задачі з підвищення якості напруги шляхом розрахунку та встановлення FACTS-пристроїв	08.12.2025 – 13.12.2025
2	2. Реалізація запропонованих рішень	15.12.2025 – 27.01.2026
3	3. Економічне обґрунтування запропонованих рішень	29.12.2025 – 03.01.2026
4	Висновки, перелік посилань, вступ, зміст, реферат	05.01.2026 – 10.01.2026
5	Подання завершеної роботи. Перевірка на академічний плагіат	12.01.2026 – 17.01.2026
6	Остаточне оформлення роботи, презентаційного матеріалу, автореферату	19.01.2026 – 23.01.2026
7	Рецензування завершеної роботи. Захист	24.01.2026 – 28.01.2026

Здобувач

(Віктор СКРИПНІЧЕНКО)

Керівник роботи

(Юрій ПАПАЇКА)

АНОТАЦІЯ

Скрипніченко В.О. Забезпечення нормованих показників якості напруги в системі електропостачання тягового рухомого складу. (63 сторінки машинописного тексту, 25 рисунків, 5 таблиць, 13 використаних джерел, додатки). – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». ОПП «Енергоефективні технології в системах електрозабезпечення гірничих та металургійних підприємств» – ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Запоріжжя, 2026.

Об'єктом дослідження є тягова мережа 10кВ на кар'єрній ділянці залізничного цеху.

Предметом дослідження є процеси, електромагнітні завади та збурення, що виникають в системі електропостачання тягового рухомого складу.

У першому розділі проведено аналіз предметної області (літературний огляд, причини погіршення якості напруги, сучасні тенденції Smart Grid). Постановка задач з підвищення якості напруги шляхом впровадження FACTS-пристроїв. Також проведено аналіз впливу нестабільності напруги на роботу електроприводів та електронних систем управління рухомого складу. Здійснено постановку задач дослідження з підвищення якості напруги в системі.

У другому розділі реалізація запропонованого підходу. Розрахунки показників якості напруги у системі живлення тягового рухомого складу. Розрахунок та вибір параметрів корегуючих пристроїв. Дослідження змін показників якості на математичній моделі.

У третьому розділі Економічне обґрунтування заходів нормалізації якості напруги. Висновки. Перелік використаних джерел. Додатки.

Перелік графічного (демонстраційного) матеріалу; 1. Однолінійна принципова схема електропостачання; 2. Схема заміщення для розрахунків показників якості напруги, 3. Розрахунки параметрів ФКУ та/або активних фільтрів, 4. Результати нормалізації показників якості.

ТЯГОВІ ПІДСТАНЦІЇ, КАР'ЄРНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ЗАВАДИ, НЕСИМЕТРІЯ, НЕСИНУСОЇДАЛЬНІСТЬ, ЗБУРЕННЯ, FACTS-ПРИСТРОЇ, SMART GRID.

ЗМІСТ

ЗМІСТ	5
ВСТУП	7
1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ	8
1.1 Аналіз предметної області	8
1.2 постановка задач з підвищення якості напруги шляхом впровадження FACTS-пристроїв	9
2 РЕАЛІЗАЦІЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ РІШЕНЬ	4
2.1 Розрахунки показників якості напруги у системі живлення тягового рухомого складу	4
2.2 Розрахунок та вибір параметрів корегуючих пристроїв	13
2.3 Дослідження змін показників якості на математичній моделі	20
3 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАХОДІВ НОРМАЛІЗАЦІЇ ЯКОСТІ НАПРУГИ	25
ВИСНОВКИ	29
4 ПЕРЕЛІК ГРАФІЧНОГО (ДЕМОНСТРАЦІЙНОГО) МАТЕРІАЛУ	31
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	39

ВСТУП

EMC в даний час належить до першочергових завдань для вирішення у електроенергетиці як в теоретичному, так і в прикладному плані. Значимість цієї проблеми настільки ж велика, як і відомі проблеми екології, енергетичної безпеки та енергоресурсозбереження. Її економічний характер свідчить про величезні збитки, які виникають в результаті недотримання вимог EMC. Так, щорічний економічний збиток, обумовлений незадовільним рівнем EMC в промисловості та в побуті, становить (за різними оцінками) від 100 до 500 млрд. євро.

В роботі розглядаються проблеми які виникають в тяговій мережі 10-1.5кВ через потужні однофазні навантаження та гармонійні спотворення від випрямлячів.

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Проблематика якості напруги

У науковій літературі якість напруги розглядається як сукупність показників, що характеризують відповідність параметрів електричної енергії встановленим стандартам (EN 50160, IEEE 1159). Дослідження показують, що в умовах переходу до інтелектуальних мереж проблема якості напруги набуває системного характеру, оскільки Smart Grid поєднує силову електроніку, розподілені джерела генерації та інформаційно-комунікаційні технології.

Оглядові роботи підкреслюють, що традиційні методи компенсації реактивної потужності стають недостатньо ефективними, а ключову роль у покращенні якості напруги відіграють активні та керовані засоби, зокрема FACTS-пристрої та інтелектуальні системи моніторингу.

Аналіз джерел дозволяє виділити такі ключові фактори погіршення якості напруги:

Зростання частки нелінійних навантажень (перетворювачі, електроприводи, побутова електроніка), що призводить до гармонічних спотворень напруги та струму.

Інтеграція розподілених джерел енергії (DER), зокрема вітрових та сонячних електростанцій, які спричиняють коливання напруги та локальні проблеми напругової стійкості.

Швидкозмінні режими роботи мережі, що викликають провали, перенапруги та флікери, особливо в розподільних мережах.

Обмежені можливості класичних засобів регулювання, таких як механічні РПН трансформаторів, які не забезпечують достатньо швидкої реакції на збурення.

Концепція Smart Grid передбачає перехід від пасивних електричних мереж до активних, самокерованих систем, орієнтованих на підвищення надійності та якості електропостачання. Ключовими тенденціями є:

Інтелектуальний моніторинг якості напруги з використанням розподілених вимірювальних пристроїв та методів обробки великих даних.

Широке застосування силової електроніки та FACTS-пристроїв, які забезпечують гнучке та швидкодіюче регулювання напруги й потоків потужності.

Інтеграція ІКТ та IoT-рішень, що дозволяє реалізувати адаптивні алгоритми керування якістю напруги в реальному часі.

Перехід до децентралізованого керування, коли споживачі та джерела генерації стають активними учасниками регулювання параметрів мережі.

1.2 постановка задач з підвищення якості напруги шляхом впровадження FACTS-пристроїв

Сучасні електроенергетичні системи характеризуються зростаючою часткою відновлюваних джерел енергії, нелінійних навантажень та динамічних режимів роботи, що призводить до погіршення показників якості напруги (відхилення рівня напруги, коливання, флікери, гармонічні спотворення, зниження стійкості). Одним з ефективних інструментів вирішення цих проблем є впровадження пристроїв FACTS (Flexible AC Transmission Systems), які забезпечують швидке та кероване регулювання параметрів електричної мережі на основі силової електроніки.

Пасивні фільтри характеризуються високою здатністю послаблювати гармонійні збурення та призначені для застосування в системах, де необхідно зменшити спотворення гармонік струму в певних межах. Використання пасивних фільтрів сприяє зменшенню термічного та електричного перевантаження, спричиненого гармонічними струмами в установках, що включають електроприводи зі змінною швидкістю, ДБЖ, силові випрямлячі та інші нелінійні трифазні навантаження. Типові застосування включають навантаження, присутні в кондиціонуванні повітря, водоочищенні, нафтовій промисловості та промислових процесах автоматизації загалом.

Високі значення гармонійних спотворень та аномальні значення напруги нейтралі відносно потенціалу землі можуть спричинити виходи з ладу обладнання, що призведе до простоїв виробництва та дорогого ремонту розподільної мережі. Важливо, щоб користувач знав про дорогі проблеми та небезпеки, пов'язані з високим рівнем гармонік, особливо з огляду на значне збільшення використання нелінійних пристроїв. Гармонічні складові можуть суттєво впливати на розподільну мережу, впливаючи на всі підключені конструкції та обладнання. Гармонічні спотворення спричиняють такі проблеми в установці:

- 1) перегрівання провідників, зокрема нейтрального, за наявності однофазних спотворених навантажень;
- 2) перегрівання трансформаторів середньої/низької напруги;
- 3) гармонійне спотворення напруги, спричинене насиченням трансформаторів середньої/низької напруги;
- 4) перегрів стандартних трансформаторів живлення з подальшим дорогим простоєм та ремонтом або заміною трансформатора;
- 5) резонанс з іншими реактивними компонентами на тій самій лінії електропередач (наприклад, блоки корекції коефіцієнта потужності);
- 6) низький коефіцієнт потужності;
- 7) резонанс, що спричиняє перенапругу;
- 8) збільшення витрат на постачання електроенергії через гармонічні втрати;
- 9) перешкоди в телекомунікаційних системах та обладнанні;
- 10) нерегулярна робота реле керування та захисту;

- 11) втручання автоматичних вимикачів та інших захисних пристроїв;
- 12) вихід з ладу або несправність комп'ютерів, приводів двигунів, ланцюгів освітлення та інших чутливих навантажень;

Пасивні фільтри – це додаткові фільтри, які зазвичай встановлюються на лінії живлення приводу. Фільтри складаються з комбінації індуктора (фільтр-індуктор)-конденсатора, вставленого у вивід від асиметричного послідовного індуктора (основний індуктор). Продуктивність пасивних фільтрів гармонік дуже висока: вони зменшують гармонійні спотворення струму зі 100% від THDi до типових значень нижче 5%; фільтри складаються з конденсаторів, які утворюють резонансний контур з реактором (рис.1.1), що має високий імпедансний шлях на основній частоті та низький імпедансний шлях на вищих питомих частотах. Пасивні фільтри частіше підключаються до окремих навантажень у системі, а не до загальної точки з'єднання, оскільки застосування вимагає постійного навантаження для ефективного пом'якшення гармонік. Пасивний фільтр гармонік встановлюється послідовно з лінією і тому повинен бути обраний відповідно до струму, що поглинається навантаженням або групою навантажень. Пасивні фільтри гармонік гарантують відмінне згасання та не потребують налаштування відповідно до параметрів імпедансу місця встановлення.

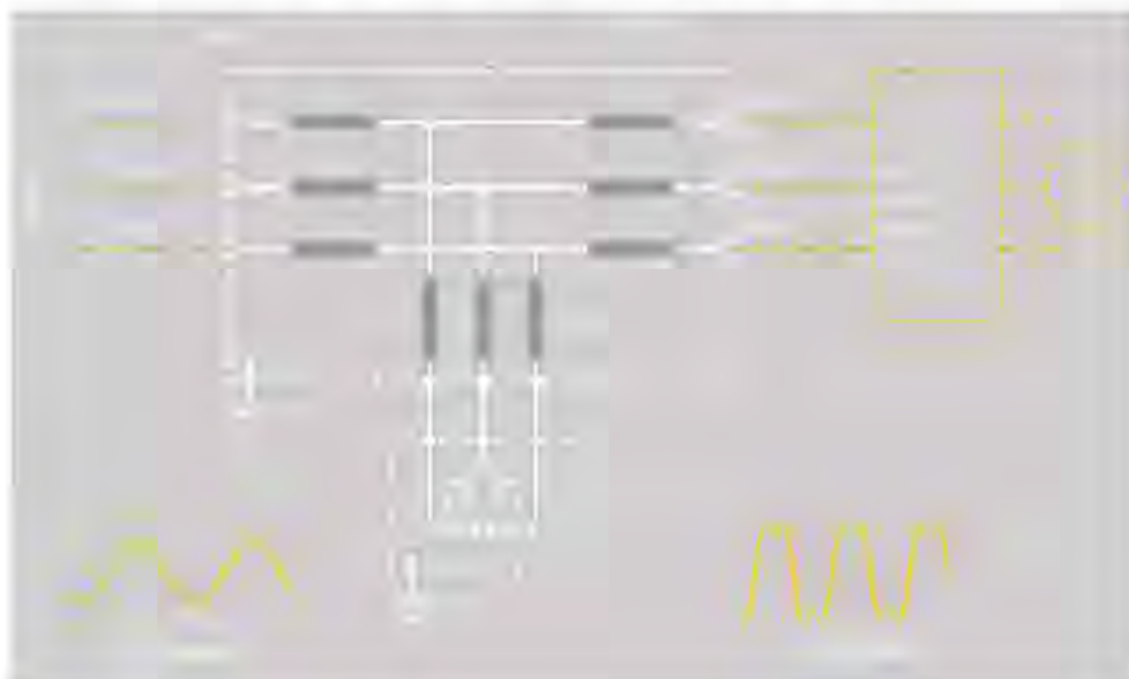


Рисунок 1.1 – Підключення пасивного фільтра послідовно з навантаженням

Активні фільтри, також відомі як «активні гармонічні компенсатори», усувають гармоніки за рахунок створення зворотної форми хвилі, яка компенсує спотворення.

Активні фільтри забезпечують оптимальне придушення гармонік незалежно від кількості навантажень та профілю використання.

Ці фільтри, встановлені паралельно мережі (рис.1.2), мають розмір для усунення заданої кількості гармонічного струму з системи. Типове застосування включає навантаження, наявні в складних промислових підприємствах; в плавильних, прокатних станах і зварювальних установках; у нафтогазовому секторі; в установках генерації, в комерційних і житлових будинках, в системах вентиляції тунелів і в центрах обробки даних. Фільтри активної потужності в модульній топології є найкращим рішенням для компенсації змінного коефіцієнта потужності та гармонік. Маючи високі показники струму до 1920А, вони адаптовані до будь-якого розміру навантаження для максимальної універсальності використання APF не тільки компенсує струм гармонік, але й покращує коефіцієнт потужності. Він також буде коригувати або провідний, або відстаючий коефіцієнт потужності. APF може компенсувати гармоніки до 51-го порядку менш ніж за 1 мс.

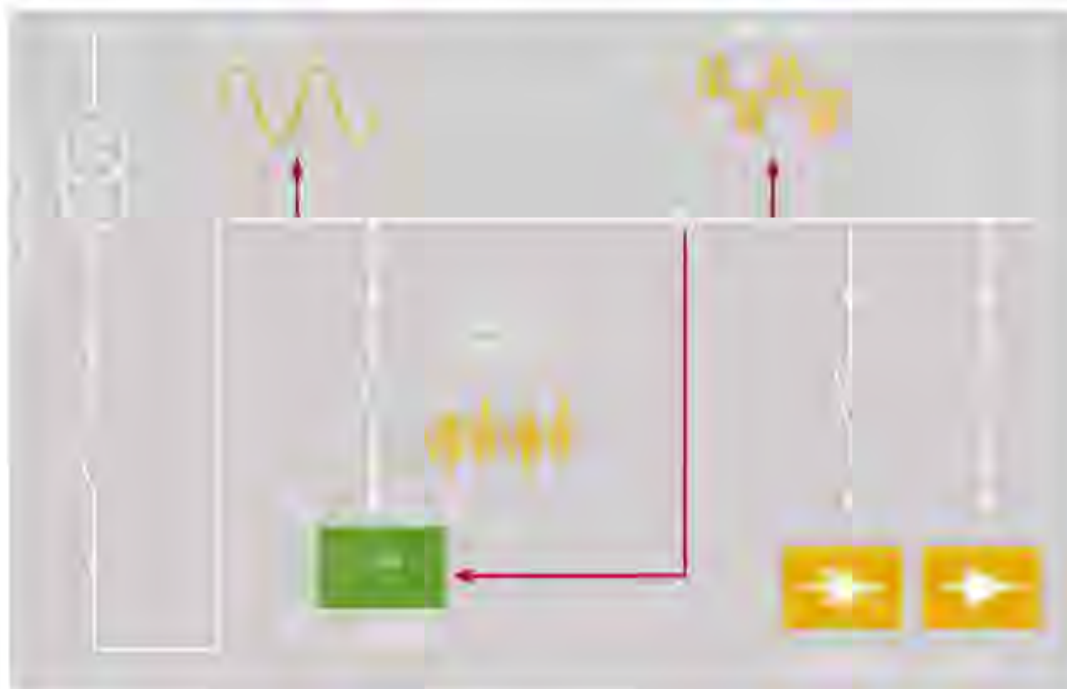


Рисунок 1.2 – Підключення активного фільтра паралельно до навантаження

Перевагою паралельного підключення активного фільтра гармонік є простота модифікації наявних систем та масштабування стандартних вимірювальних трансформаторів струму. Недоліком є те, що фільтр може впливати на напругу гармонік лише побічно, а також те, що немає можливості буферизації напруги.

При послідовному підключенні активний фільтр гармонік підключається до мережі через обмотку трансформатора. Перевага цього рішення полягає в тому, що можна безпосередньо впливати на напругу гармонік і зменшувати падіння напруги, так як в такій структурі фільтр діє як джерело напруги. Недоліками є значно більш висока вартість в

порівнянні з паралельним (шунтувальним) підключенням, утрудненість модернізації наявних систем через необхідність послідовного трансформатора і витратність масштабування через наявність трансформатора.

Перевагою активних фільтрів є те, що вони можуть фільтрувати гармоніки одночасно. При використанні пристрою 3P4W (3 фази, 4 дроти) можуть бути зменшені струми провідника нейтралі (3-тя гармоніка і гармоніки, кратні трьом). Також немає обов'язкової необхідності ретельного гармонійного аналізу перед проектуванням фільтра. Головний недолік активних фільтрів в порівнянні з пасивними – це вартість.

В нашому випадку основними джерелами ЕМС є потужні однофазні тягові агрегати типу ОПЕ-1АМ. (Однофазний, Промисловий Електровоз, Автономний модернізований). З 1988 року по сьогодні завод випускає модернізовану версію ОПЭ1АМ що складаються з електровоза та двох моторних думпкарів. Призначений для роботи на залізницях відкритих гірничих розробок, електрифікованих на однофазному змінному струмі промислової частоти 50 Гц при напрузі контактної мережі 10 кВ.

Схема живлення тягової мережі однофазного струму за допомогою трифазного трансформатора зі схемою з'єднання Y/Δ-11 зображена на (рис. 1.3)



Рисунок 1.3 – Схема живлення тягової мережі однофазного струму за допомогою трифазного трансформатора

На електровозі встановлено трансформатор ОДЦЕ-8000/10 масою 9000 кг та номінальною потужністю 7338 кіловольт-ампер. Напряга мережевої обмотки 10 кВ. Діапазон відхилень робочої напруги 7-11.5кВ Дві тягові обмотки, кожна з яких розділена на чотири секції, розраховані

на номінальну напругу 1900 В, випрямлений струм тягової обмотки-1860А, напруга обмотки власних потреб - 250, 400 і 625 В, струм 200, 600, 800А. Для без струмового перемикачання вторинної обмотки силового трансформатора служить розташований над ним головний контролер ЕКГ-2. Дві випрямно-перетворювальні установки ВПБ-6000-У2 потужністю 6000 кВт кожна з діодами В2-320 та тиристорами Т2-320 дозволяють плавно змінювати випрямлену напругу за допомогою блоку управління БУЗ9Д. Плавне тиристорне регулювання напруги в межах кожної з чотирьох зон здійснюється шляхом зміни кута відкриття тиристорів, включених у розщеплені плечі мостів випрямно-перетворювальної установки. Прямий і зворотний переходи між зонами виробляються при без струмовому комутації контактів головного контролера. На електровозі передбачено також автоматичний перехід на самозбудження при аварійному знятті напруги.

На кожному тяговому агрегаті по дві випрямно-перетворювальні установки ВПБ-6000-У2 потужністю 6000 кВт кожна (рис. 1.4) з діодами В2-320 та тиристорами Т2-320. Працює за однофазною двопульсною (двонапівперіодна) мостовою схемою випрямлення (рис. 1.5). При мостовій схемі випрямлення діоди VD1 і VD3 утворюють катодну, а діоди VD2 і VD4 – анодну групи пристроїв. До однієї діагоналі моста підключена вторинна обмотка трансформатора Т, а інша є виводами позитивного і негативного полюсів випрямляча. Діоди проводять струм попарно: VD1 і VD2 – протягом позитивних, а VD3 і VD4 – протягом негативних напівперіодів живильної напруги. На відповідних інтервалах вони спільно з вторинною обмоткою і резистором навантаження R_d утворюють замкнене коло струму. У кожен момент часу струм проводить пара діодів: діод катодної групи з більш високим потенціалом на аноді і діод анодної групи з більш низьким потенціалом катода відносно потенціалів інших діодів відповідної групи.

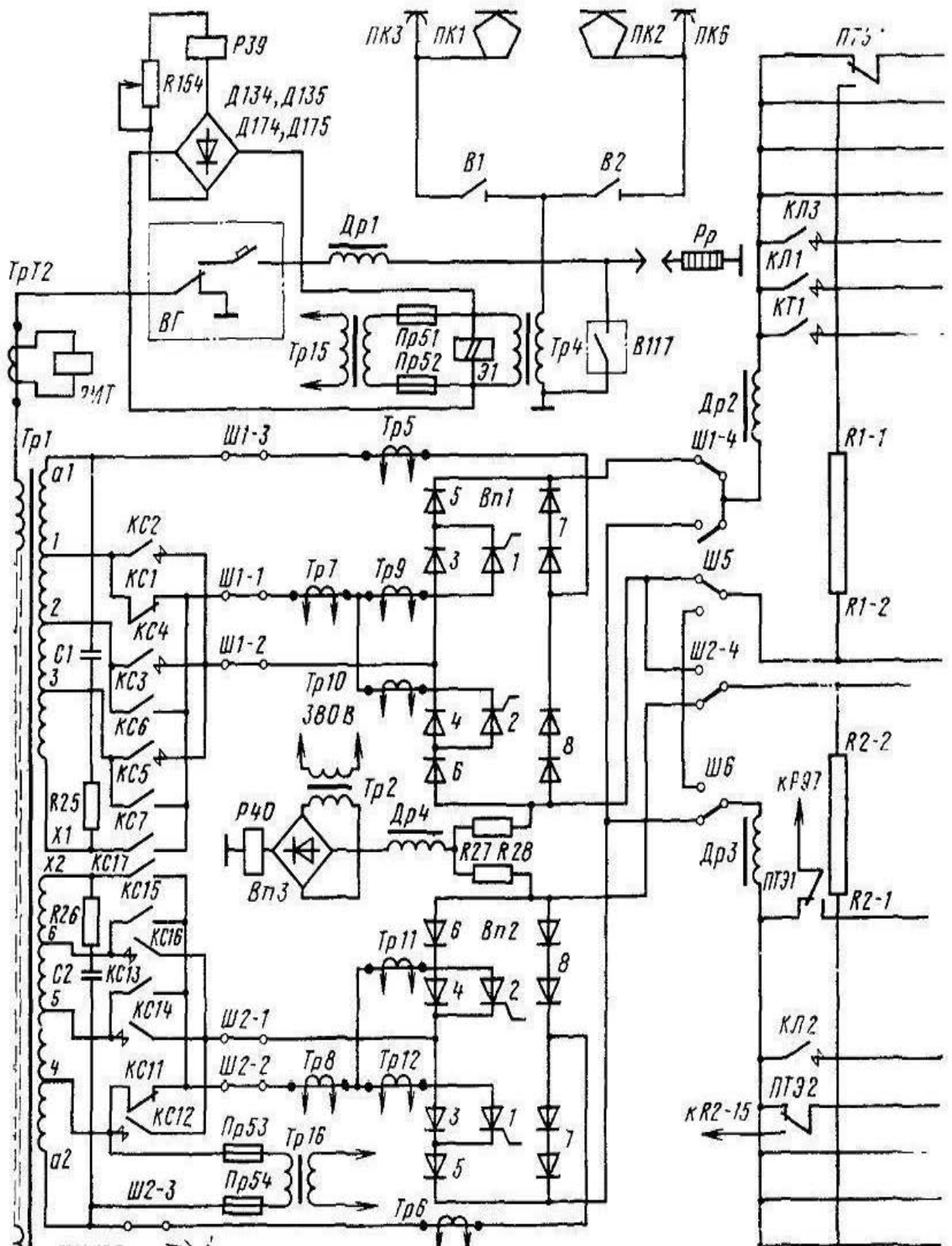


Рисунок 1.4 – Однофазний двопульсний мостовий випрямляч Вп1 і Вп2

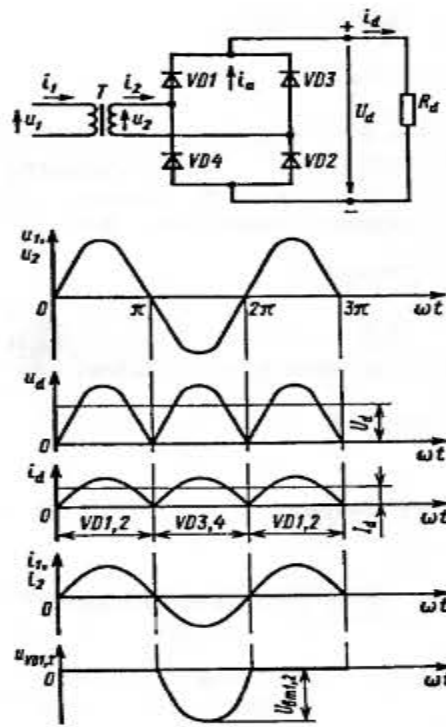


Рисунок 1.5 – Однофазна мостова схема випрямлення

Виявлено що основним джерелом електромагнітних завад є випрямно-перетворювальні установки тягових агрегатів. Вони є джерелами 5,7,11,13 гармонік так само як і 6 пульсні вентильні перетворювачі в мережах постійного струму.

Аналіз впливу нестабільності напруги на роботу електроприводів та електронних систем управління рухомого складу.

На т.а. №37 під час капітального ремонту була проведена модернізація компресорних установок. Було встановлено сучасні роторно пластинчасті компресорні установки Mattei ERC 30 (рис. 1.6). З мікропроцесорним контролерами MAESTROxs (рис. 1.7).

Існує проблема переходу контролера в захист або вимкнення під час режимів роботи тягового агрегата коли все обладнання працює в своїх номінальних режимах через невідповідність сучасним стандартам EMC.



Рисунок 1.6 – Компресорна установка роторно пластинчатого типу Mattei ERC 30 з мікропроцесорним керуванням



Рисунок 1.7 – Мікропроцесорний програмований пристрій управління компресором MAESTROx

2 РЕАЛІЗАЦІЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ РІШЕНЬ

2.1 Розрахунки показників якості напруги у системі живлення тягового рухомого складу

Для споживача ЕЕ із схемою електропостачання як на (рис. 2.1) розраховую напругу та струм n -ної гармоніки і коефіцієнт несинусоїдальності. Вибираю силові резонансні фільтри (СРФ) для підстанції з напругою U_2 на шинах (рис. 2.1). Обираю та обґрунтовую схему фільтрів.

Усі необхідні для розрахунків дані наведені у (табл. 2.1).

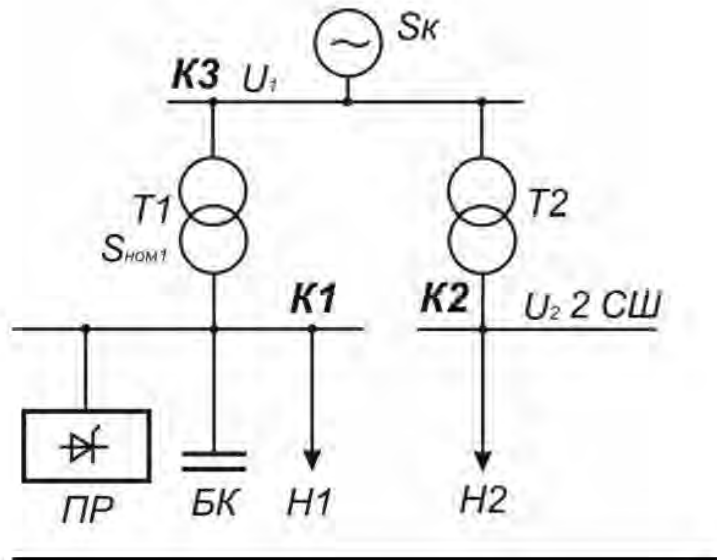


Рисунок 2.1 – Спрощена схема електропостачання

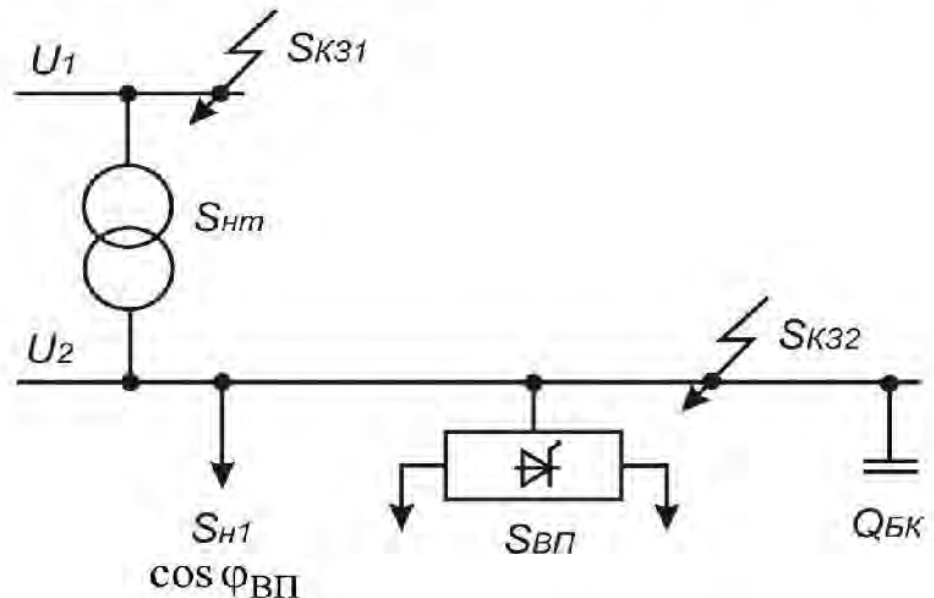


Рисунок 2.2 – Схема електричної мережі з нелінійним навантаженням

Таблиця 2.1 – Дані для розрахунків

1	Потужність к.з. на стороні ВН Скз, МВА	300
2	Напруга сторони ВН U1, кВ	10
3	Напруга сторони низької напруги U2, кВ	1.5
4	Потужність БК Qбк, Мвар	6
5	Потужність трансформаторів ПП Sном1, МВА	2x16
6	Потужність тягових трансформаторів Sном2, МВА	3x7.3
7	Потужність високовольтних асинхронних двигунів Sномад, МВт	3x0.32
8	Тип та поперечний переріз контактного дроту Довжина КЛ Lкл, км	МФ-120 5
9	Навантаження Н1: Потужність повного навантаження SH1, МВА Відносна провідність зворотної послідовності, Коефіцієнт потужності, cosφ3	5 5 0.8
10	Навантаження Н2 Потужність повного навантаження SH2, МВА Відносний повний опір негативної послідовності, z2	6 0.5+j0.56
	Вихідні дані несиметричного навантаження	
1	Повна потужність навантаження Sвп, МВА Відносна провідність зворотної послідовності, у1 Коефіцієнт потужності, cosφ1	6 0.6 0.7
	Вихідні дані на нелінійному навантаженні	
1	Потужність перетворювача Spr, МВА	6
2	Номинальна потужність трансформатора перетворювача Sном.т., МВА	7.3
3	Фазність перетворювача	6
4	Коефіцієнт потужності cosφпр	0.78

Розрахунок показників несиметрії в точках К1, К2, К3.

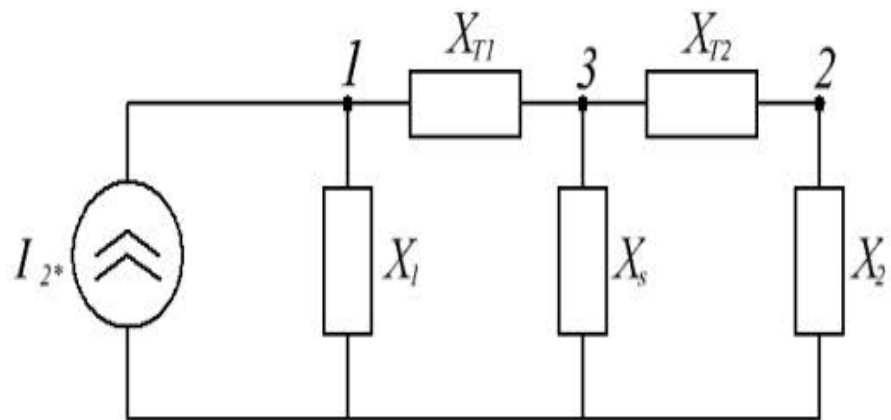


Рисунок 2.3 – Схема заміщення зворотної послідовності мережі

Модуль і аргумент комплексного опору зворотної послідовності визначається з урахуванням симетричного і несиметричного навантаження.

Модуль опору зворотній послідовності (в відносних одиницях) для точки К1 знаходиться за наступною формулою.

$$Z_{2\Sigma^*} = \frac{\sqrt{(\sum_{i=1}^n S_{ном} \cdot \cos\varphi_i)^2 + (\sum_{i=1}^n S_{ном} \cdot \sin\varphi_i)^2}}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n y_i \cdot \cos\varphi_i)^2 + (\sum_{i=1}^n y_i \cdot \sin\varphi_i)^2}}$$

де $S_{ном}$ - повна номінальна потужність і-го приєднання, МВА;
 y_i - відносне значення провідності зворотної послідовності і-го приєднання;

φ_i - кут і-го приєднання лінійної (нелінійної) частини навантаження;

$$Z_{2\Sigma^*} = \frac{\sqrt{(4 \cdot 0,7 + 6 \cdot 0,7)^2 + (4 \cdot 0,71 + 6 \cdot 0,71 - 8 \cdot 1)^2}}{\sqrt{(4 \cdot 0,7 \cdot 0,6 + 6 \cdot 0,7 \cdot 1)^2 + (4 \cdot 0,71 \cdot 0,6 + 6 \cdot 1 \cdot 0,71 - 8 \cdot 1 \cdot 1)^2}} = \frac{\sqrt{49 + 0,81}}{\sqrt{34,57 + 4,16}} = \frac{7,05}{6,22} = 1,13 \text{ в. о.} \quad (2.1)$$

Аргумент опору зворотної послідовності

$$Z_{2\Sigma^*} = \arctg \frac{\sum_{i=1}^n S_{ном} y_i \cdot \sin\varphi_i}{\sum_{i=1}^n S_{ном} y_i \cdot \cos\varphi_i}$$

$$\arg Z_{2\Sigma^*} = \arctg \frac{(4 \cdot 0,71 \cdot 0,6 + 6 \cdot 0,71 \cdot 1 - 8 \cdot 1 \cdot 1)}{(4 \cdot 0,7 \cdot 0,6 + 6 \cdot 0,7 \cdot 1)} = \frac{-2}{5,88} = \arctg -0,34 = (2.2)$$

-18.77°

Повний опір зворотної послідовності в точці К1

$$Z_{2(1)} = 1,13e^{j18,77}$$

$$Z_{2(1)} = 1,13 \cos(18,77^\circ) + j1,13 \sin(18,77^\circ) = 1,06 + j0,36 \quad (2.3)$$

Для розрахунку опорів елементів схеми заміщення приймаємо базисні умови: $S_6 = 10$ МВА; $U_6 = 6,3$ кВ.

Базисний струм

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_6} = \frac{10}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 0,916 \text{ кА}$$

Опір трансформаторів:

$$X_{T1} = X_{T2} = \frac{U_k}{100} \frac{S_6}{S_{HT}}$$

U_k – напруга досліду короткого замикання трансформатора, %;

S_{HT} – номінальна потужність трансформатора, МВА;

S_6 – базисна потужність

$$X_{T1} = X_{T2} = \frac{7}{100} \frac{10}{16} = 0,043 \quad (2.4)$$

Опір системи:

$$X_{S^*} = \frac{S_6}{S_{K3}}$$

де S_{K3} – потужність короткого замикання на стороні високої напруги (ВН);

$$X_{S^*} = \frac{10}{1200} = 0,008 \quad (2.5)$$

Повний опір зворотної послідовності в точці К2:

$$Z_{2(2)} = Z_2^* \cdot \frac{S_6}{S_{H2}}$$

де Z_2^* – відносний повний опір зворотної послідовності;

S_{H2} – повна потужність навантаження, МВА;

$$Z_{2(2)} = (0,5 + j0,56) \frac{10}{6} = 0,83 + j0,93 \quad (2.6)$$

Відносне значення струму зворотної послідовності приведене до базисних умов:

$$I_{2(6)} = I^* \cdot 2 \cdot \frac{S_n}{S_6}$$

де I^* – відносне значення струму зворотної послідовності;

S_n – повна номінальна потужність, МВА

$$I_{2(6)} = 1,4 \frac{6}{10} = 0,84 \quad (2.7)$$

Точка К1.

Сумарний еквівалентний опір зворотної послідовності:

$$Z_{*2\Sigma(1)} = \frac{Z_2(1) \left(jXt_1 + \frac{jXs(jXt_2 + Z_2(2))}{jXs + jXt_2 + Z_2(2)} \right)}{Z_2(1) + jXt_1 + \frac{jXs(jXt_2 + Z_2(2))}{jXs + jXt_2 + Z_2(2)}}$$

$$Z_{*2\Sigma(1)} = \frac{1,06 + j0,36 \left(j0,043 + \frac{j0,0083(j0,043 + 0,83 + j0,93)}{j0,0083 + j0,043 + 0,83 + j0,93} \right)}{1,06 + j0,36 + j0,043 + \frac{j0,0083(j0,043 + 0,83 + j0,93)}{j0,0083 + j0,043 + 0,83 + j0,93}} \quad (2.8)$$

- 1) $0,83 + j0,973 = 1,28e^{j49}$
- 2) $0,0083 = 0,0083e^{j90}$
- 3) $0,0083e^{j90} + 1,28e^{j49} = 1,2883e^{j139}$ - чисельник
- 4) $0,83 + j0,973 + j0,0083 = 1,2842e^{j50}$ - знаменник
- 5) $\frac{1,2883e^{j139}}{1,2842e^{j50}} = 1,003e^{j89}$
- 6) $1,003e^{j89} = 1,003 \cos 89 + j1,003 \sin 89 = 0,0176 + j1,0028$
- 7) $0,0176 + j1,0028 + j0,043 = 0,0176 + j1,0458$
- 8) $1,06 + j0,36 \cdot (0,0176 + j1,0458) = 0,0186 + j0,37 = 0,37e^{j21}$
- 9) $1,06 + j0,36 + 0,0176 + j1,0458 = 1,08 + j1,41 = 1,77e^{j52}$
- 10) $\frac{0,37e^{j21}}{1,77e^{j52}} = 0,2e^{j-31}$

Коефіцієнт несиметрії:

$$K_{2U(1)} = |Z_{*2\Sigma(1)}| I_{2(6)} = 0,2 \cdot 0,84 = 0,17 \quad (2.9)$$

Оскільки показники несиметрії в вузлі 1 не перевищують значення допустимі ГОСТ (до 2% - нормальна несиметрія; до 4% - гранично допустима несиметрія (1 год 20 хв. На добу), тоді не має необхідності розробки технічних заходів для зниження несиметрії.

Сумарна потужність БК:

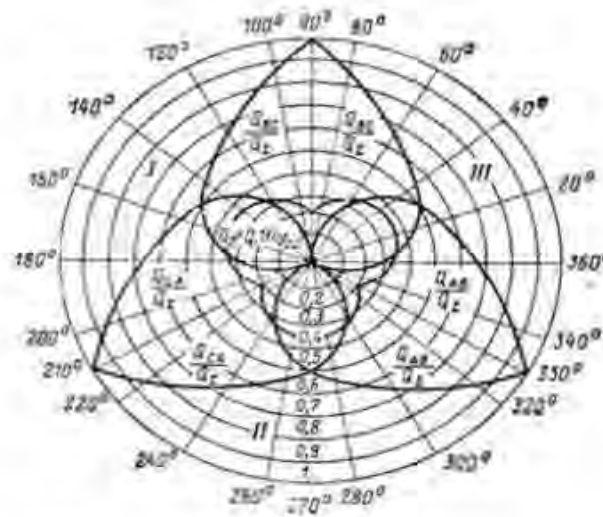
$$Q_{\Sigma} = 2\sqrt{3} K I_2 U_H \sin(\psi_2 + \zeta)$$

де K – відносна величина зниження несиметрії ($K = 1$, якщо планується повне усунення несиметрії);

I_2 – модуль струму зворотної послідовності після несиметричного навантаження;

ψ_2 – кут струму зворотної послідовності несиметричного навантаження;

ζ – кут, який залежить від аргументу струму зворотної послідовності, розміщений на ділянках I, II и III (рис.2.2);



- I. $\xi = -\frac{\pi}{3}$ при $90^\circ \leq \varphi_2 \leq 210^\circ$
- II. $\xi = 0$ при $210^\circ \leq \varphi_2 \leq 330^\circ$
- III. $\xi = \frac{\pi}{3}$ при $330^\circ \leq \varphi_2 \leq 90^\circ$

$$330^\circ \leq \varphi_2 \leq 90^\circ$$

Рисунок 2.4 – Діаграма розподілу аргументу φ_2 струму зворотної послідовності I_2

Струм зворотної послідовності переведений в іменовані одиниці:

$$I_2 = I_{2(\Theta)} I_5$$

$$I_2 = 1,65 \cdot 916 = 1511,4 \text{ А} \quad (2.10)$$

Струм зворотної послідовності несиметричного навантаження:

$$I_2 = I_2 \cos \varphi_2 + j I_2 \sin \varphi_2$$

де $\cos \varphi_2$ – коефіцієнт потужності печі електрошлакового переплаву;

$$I_2 = 1511,4 \cdot 0,7 + j 1511,4 \cdot 0,71 = 1057,9 + j 1073,094 \quad (2.11)$$

Кут струму зворотної послідовності несиметричного навантаження:

$$\varphi_2 = \arctg \frac{1073,094}{1057,98} = 46^\circ$$

$$Q_\Sigma = 2\sqrt{3} \cdot 1511,4 \cdot 6 \sin (46 + 60) = 29 \text{ Мвар} \quad (2.12)$$

За діаграмою розподілу аргументу струму зворотної послідовності видно, що перша ємність підключена між фазами В і С ($K_{BC}=0,55$), а друга – А і В ($K_{AB}=0,45$).

Реактивна потужність підключена до фаз В і С:

$$Q_{BKBC} = K_{BC} Q_\Sigma$$

$$Q_{BKBC} = 0,55 \cdot 7000 = 3850 \text{ Мвар} \quad (2.13)$$

Реактивна потужність підключена до фаз А і В:

$$Q_{BKAB} = K_{AB} Q_\Sigma$$

$$Q_{BKAB} = 0,45 \cdot 7000 = 3150 \text{ Мвар} \quad (2.14)$$

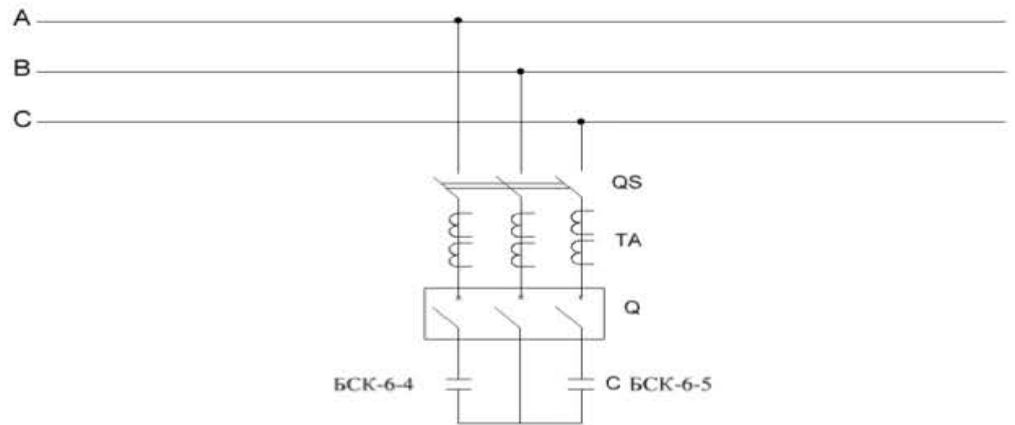


Рисунок 2.5 – Схема симетруючого улаштування

Розрахунок несинусоїдальності напруги

Згідно з завданням необхідно визначити коефіцієнт викривлення синусоїдальності кривої напруги в точках К1, К2, К3 і порівняти їх з нормами ГОСТ.

Складаємо схему заміщення для мережі та точки К3 (РИС. 2.6).

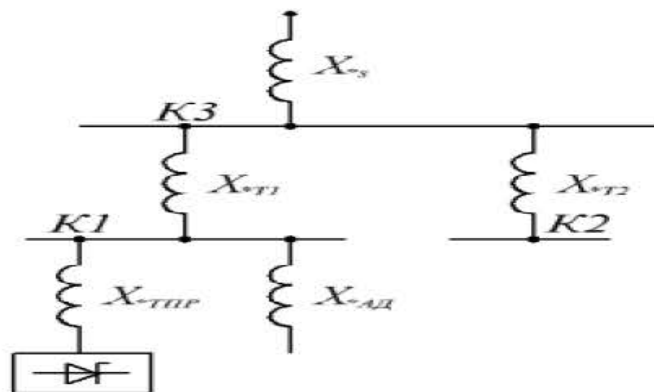


Рисунок 2.6 – Схема заміщення для мережі та точки К3

Для розрахунку опорів елементів схеми заміщення приймаємо базисні умови: $S_6 = 10$ МВА.

Опір трансформаторів

$$X_{T1} = X_{T2} = \frac{U_k}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{HT}}$$

U_k – напруга випробування короткого замикання трансформатора, %;

S_{HT} – номінальна потужність трансформатора, МВА;

S_6 – базисна потужність;

$$X_{T1} = X_{T2} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{10}{32} = 0,032 \quad (2.15)$$

Опір системи:

$$X_s = \frac{S_{\delta}}{S_{кз}}$$

де $S_{кз}$ – потужність короткого замикання на стороні високої напруги (ВН);

$$X_{s^*} = \frac{10}{2000} = 0,005 \quad (2.16)$$

Опір трансформатора перетворювача:

$$X_{ТПР} = \frac{U_k}{100} \cdot \left(1 + \frac{K_p}{4}\right) \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{нТПР}}$$

де $K_p=4$ для 12-ти фазної схеми перетворювача;

$S_{нТПР}$ – номінальна потужність трансформатора перетворювача;

$$X_{*ТПР} = \frac{14}{100} \left(1 + \frac{4}{4}\right) \frac{10}{16} = 0,175 \quad (2.17)$$

Опір двигуна:

де X'_d – перехідний опір двигуна;

$P_{ад}$ – потужність високовольтних асинхронних двигунів, МВт;

$$X_{*ад} = 0,12 \frac{10}{5 \cdot 1,0/0,85} = 0,282 \quad (2.18)$$

Еквівалентуємо схему відносно точки К3 (рис. 2.6).

Сумарний опір наведений до точки К3:

$$X_{*\Sigma} = \frac{0,005 \cdot 0,032}{0,005 + 0,032} = 0,0432 \quad (2.19)$$

Еквівалентуємо схему відносно точки К1 (рис. 2.7).

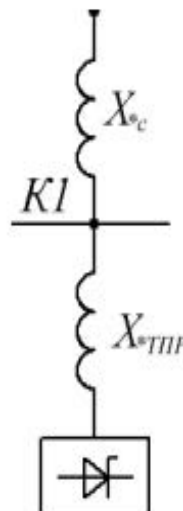


Рисунок 2.7 – Еквівалентуємо схему відносно точки К1

Сумарний опір наведений до точки К1:

$$X_{*c} = \frac{(0,0432+0,032)0,282}{0,0432+0,032+0,282} = 0,059 \quad (2.20)$$

В інженерних розрахунках, коли допустима похибка не перевищує 10% можливо використовувати спрощену формулу визначення коефіцієнта викривлення синусоїдальності.

Точка К1.

$$K_{UK1} = X_{*c} \sqrt{\frac{3}{\pi} \frac{\sin\psi}{X_{*c} + X_{*TPP}} - \frac{9}{\pi^2}} = 0,059 \sqrt{\frac{3}{3,14} \frac{0,60}{0,059+0,175} - \frac{9}{3,14^2}} = 0,13 = 13\% \quad (2.21)$$

Знаючи коефіцієнт викривлення синусоїдальності в точці К1 можливо визначити даний коефіцієнт в будь-якій точці.

Точка К3 .

$$K_{UK3} = 0,13 \frac{0,0432}{0,032+0,0432} = 0,007 = 0,7\% \quad (2.22)$$

Точка К2.

$$K_{UK2} = 0,13 \frac{0,032}{0,032+0,005} = 0,11 = 1,1\% \quad (2.23)$$

Оскільки показники несинусоїдальності в точці К1-13% перевищують значення ГОСТ (до 8% гранична допустиме значення викривлення синусоїдальності) необхідна розробка технічних заходів для зниження несинусоїдальності.

2.2 Розрахунок та вибір параметрів корегуючих пристроїв

Для запобігання режиму перевантаження батареї конденсаторів по струму на частотах вищих гармонік батареї конденсаторів включають через реактор.

Індуктивність реактора вибирається з умови резонансу напруги при умовах щоб ланцюг реактор-батарея носила індуктивний характер на частоті найменшої гармоніки спектра.

За цих умов вибираємо параметри ФКУ:

$$(2.24) L_P = \frac{1}{11^2 (23,14 \cdot 50)^2 560 \cdot 10^{-6}} = 0,00015 \text{ Гн} = 0,15 \text{ мГн} \quad (2.15)$$

$$(2.25) C_{БК} = \frac{7 \cdot 10^{12}}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 6300^2} = 560 \text{ мкФ} \quad (2.15)$$

Приймаємо до установки ФКУ-11-6-7000-У3, й реактор типу СРОСЗ-1000/07 У3 на струм 1000А й індуктивністю 0,15мГн.

Розрахунок напруги та струму 5, 7, 11, 13 гармоніки і коефіцієнта несинусоїдальності. Вибрати силові резонансні фільтри (СРФ) для підстанції промислового підприємства з напругою U_2

Вихідні дані:

- $S_k = 300$ МВА;
- $U_1 = 10$ кВ;
- $S_{HT1} = 16$ МВА;
- $U_2 = 1,5$ кВ;
- $S_{HT} = 7.3$ МВА;
- $\cos \phi_{H1} = 0,8$;
- $S_{BП} = 6$ МВА;
- $\phi_{BП} = 12^\circ$;
- $p = 6$;
- $Q_{BK1} = 5$ Мвар;
- $S_{HT2} = 1$ МВА;
- $K_{3,12} = 0,8$;
- $Q_{BK2} = 0,4$ Мвар.

Складаємо схему заміщення (рис.2.8), у якій тиристорні пристрої позначаємо як генератори вищих гармонік, а система, навантаження, БК та трансформатори - опорами.

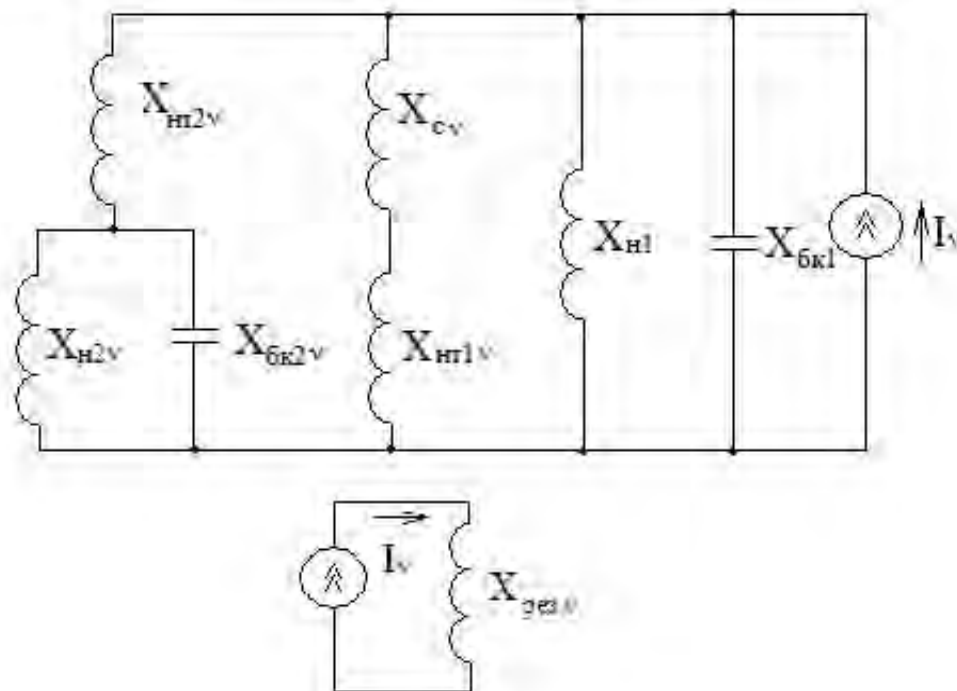


Рисунок 2.8. – Схема заміщення електричної мережі з нелінійним навантаженням

Номера гармонік, що генеруються перетворювачем, визначаємо за формулою:

$$\nu = kp \pm 1,$$

де $k = 1, 2, 3$.

Для 6-фазного перетворювача ($p = 6$) номери гармонік, що генеруються будуть:

$$v = 5, 7, 11, 13.$$

Розрахунок гармонік струму, що генеруються кількома нелінійними навантаженнями. При незмінному навантаженні джерел гармонік, їх еквівалентні величини розраховуються за формулою:

$$I_{v\Sigma} = S_{\Sigma} K_{v\Sigma} / \sqrt{3} U_v,$$

де S_{Σ} – розрахункова потужність перетворювачів, МВ·А; $K_{v\Sigma}$ – коефіцієнт, який враховує наявність здвигу фаз між гармоніками струму окремих перетворювачів.

Для $v=5$ та 7 приймається $K_{v\Sigma}=0,9$, а для $v=11$ та 13 $K_{v\Sigma}=0,75$.

Середньоквадратичне значення струму v -ї гармоніки групи реверсивних перетворювачів знаходиться за формулою:

$$I_{v\Sigma} = \frac{1}{\sqrt{3} \cdot U_v} \cdot \sqrt{\sum_{p=1}^n S_p^2 \text{ ср.кв.}}$$

де $S_p \text{ ср.кв.}$ – середньоквадратичне значення повної потужності p -го перетворювача.

Якщо до секції (системи шин) підключено 6- та 12-фазні перетворювачі, розрахункові (середньоквадратичні) значення повних потужностей яких відповідно дорівнюють $S_{6\phi}$ та $S_{12\phi}$, для визначення еквівалентних струмів гармонік застосовують вираз :

$$I_{v\Sigma} = \sqrt{S_{6\phi}^2 + S_{12\phi}^2} / \sqrt{3} U_v \quad (v=5, 7, 11, 13 \dots).$$

Еквівалентні струми гармонік, обумовлені реверсивними та на реверсивними перетворювачами, знаходяться за формулою.

Струми гармонік v -го порядку установок дугової та контактної електрозварок визначають за виразом :

$$I_{v\Sigma} = \sqrt{\sum_{p=1}^n I_{vp}^2}.$$

Еквівалентні струми гармонік дугових та люмінесцентних ламп знаходяться арифметичним додаванням гармонік окремих джерел:

$$I_{v\Sigma} = \sum_{p=1}^n I_{vp}.$$

Розрахунок гармонік напруги. Напряга гармонік розраховується на основі лінійних схем заміщення мережі для кожної гармоніки. Нелінійні навантаження представляють у виді індивідуальних або еквівалентних джерел струму. Опори елементів схем електропостачання визначають за формулами, наведеними вище. Розрахунок гармонік напруги в мережах з вентиляторними перетворювачами можливий також на основі аналізу кривих комутаційних спотворень напруги живлячих мереж.

Напряга v -ї гармоніки на шинах q -х секцій (системи шин) визначається за формулою

$$U_{vq} = x_{vq} I_{vq\Sigma}$$

де $I_{vq\Sigma}$ - струм v -ї гармоніки в q -ї гілці, обумовлений усіма джерелами гармонік; x_{vq} - опір q -ї гілки для v -ї гармоніки.

Струм v -ї гармоніки в навантаженні q -ї секції, обумовлений p -м джерелом гармонік струму I_{vp} (індивідуальним або еквівалентних в межах секції шин підстанції), знаходимо за виразом

$$I_{vp} = K_v^{(pq)} I_{vp}$$

де $K_v^{(pq)}$ - коефіцієнт розподілу струмів v -ї гармоніки між p -ю та q -ю гілками схеми заміщення.

Взаємний вплив перетворювачів різних підстанцій та секцій, працюючих роздільно, можна не враховувати при потужності КЗ живлячої енергосистеми на стороні вищої напруги 1500 МВ·А та більше.

Опори 5-тої гармоніки кожного елемента:

1) енергосистема:

$$x_{cv} = \frac{U_2^2}{S_k} \cdot v = \frac{1,5^2}{300} \cdot 5 = 0,0375 \text{ Ом}; \quad (2.26)$$

2) двообмотковий трансформатор:

$$x_{HT1v} = \frac{12v}{S_{HT1}} = \frac{12}{16} 5 = 3,75 \text{ Ом}; \quad (2.27)$$

$$x_{HT2} = \frac{12v}{S_{HT2}} = \frac{12}{1} 5 = 60 \text{ Ом}; \quad (2.28)$$

3) батареї конденсаторів:

$$x_{BK1v} = \frac{40}{Q_{BK1} \cdot v} = \frac{40}{5000 \cdot 5} = \frac{0,008}{5} = 0,0016 \text{ Ом}; \quad (2.29)$$

$$x_{BK2v} = \frac{40}{Q_{BK2}} = \frac{40}{400v} = \frac{0,1}{5} = 0,02 \text{ Ом}; \quad (2.30)$$

4) навантаження:

$$x_{H1} = \frac{12\nu}{S_{H1}} = \frac{12}{7.3} \cdot 5 = 1,64 \cdot 5 = 8,2 \text{ Ом}; \quad (2.31)$$

$$x_{H2} = \frac{12\nu}{S_{H2}} = \frac{12\nu}{S_{H2} \cdot K_{\text{зт2}}} = \frac{12\nu}{1 \cdot 0,8} = 15 \cdot 5 = 75 \text{ Ом}. \quad (2.32)$$

Еквівалентний опір схеми заміщення:

$$x_{\text{рез}\nu} = (X_{H1\nu}^{-1} - X_{BK1\nu}^{-1} + (X_{cv} + X_{HT1\nu})^{-1} + (X_{HT2} + \frac{X_{H2\nu} \cdot X_{BK2\nu}}{X_{H2\nu} - X_{BK2\nu}})^{-1})^{-1} = \\ = (8,2 - 0,0016 + (0,0375 + 3,75) + (60 + \frac{75 \cdot 0,02}{75 - 0,02})) = 0,0016 \text{ Ом}$$

Розрахункові гармоніки струму перетворювача:

$$I_{\nu\text{ВП}} = \frac{S_{\text{ВП}}}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \nu} = \frac{6000}{\sqrt{3} \cdot 1,5 \cdot \nu} = \frac{2300}{5} = 460 \text{ А}. \quad (2.33)$$

Напряга 5-тої гармоніки на секціях шин 1.5 кВ:

$$U_{\nu} = I_{\nu\text{ВП}} \cdot X_{\text{рез}\nu} = 460 \cdot 0,0016 = 0,74 \text{ В} \quad (2.34)$$

Опори 7-тої гармоніки кожного елемента:

1) енергосистема:

$$x_{cv} = \frac{U_2^2}{S_k} \cdot \nu = \frac{1,5^2}{300} \cdot 7 = 0,0525 \text{ Ом}; \quad (2.35)$$

2) двообмотковий трансформатор:

$$x_{HT1\nu} = \frac{12\nu}{S_{HT1}} = \frac{12}{16} \cdot 7 = 5,25 \text{ Ом}; \quad (2.36)$$

$$x_{HT2} = \frac{12\nu}{S_{HT2}} = \frac{12}{1} \cdot 7 = 84 \text{ Ом}; \quad (2.37)$$

3) батареї конденсаторів:

$$x_{BK1\nu} = \frac{40}{Q_{BK1} \cdot \nu} = \frac{40}{5000 \cdot 7} = \frac{0,008}{7} = 0,0011 \text{ Ом}; \quad (2.38)$$

$$x_{BK2\nu} = \frac{40}{Q_{BK2}} = \frac{40}{400\nu} = \frac{0,1}{7} = 0,014 \text{ Ом}; \quad (2.39)$$

4) навантаження:

$$x_{H1} = \frac{12\nu}{S_{H1}} = \frac{12}{7.3} \cdot 7 = 1,64 \cdot 7 = 11,48 \text{ Ом}; \quad (2.40)$$

$$x_{H2} = \frac{12\nu}{S_{H2}} = \frac{12\nu}{S_{H2} \cdot K_{\text{зт2}}} = \frac{12\nu}{1 \cdot 0,8} = 15 \cdot 7 = 105 \text{ Ом}. \quad (2.41)$$

Еквівалентний опір схеми заміщення:

$$x_{резv} = (X_{H1v}^{-1} - X_{BK1v}^{-1} + (X_{cv} + X_{HT1v})^{-1} + (X_{HT2} + \frac{X_{H2v} \cdot X_{BK2v}}{X_{H2v} - X_{BK2v}})^{-1})^{-1} =$$

$$= (11,48 - 0,0011 + (0,0525 + 5,25) + (84 + \frac{105 \cdot 0,014}{105 - 0,014})) = 0,0011 \text{ Ом}$$

Розрахункові гармоніки струму перетворювача:

$$I_{vBP} = \frac{S_{BP}}{\sqrt{3} \cdot U \cdot v} = \frac{6000}{\sqrt{3} \cdot 1,5 \cdot v} = \frac{2300}{7} = 328 \text{ А.} \quad (2.42)$$

Напряга 7-тої гармоніки на секціях шин 1.5 кВ:

$$U_v = I_{vBP} \cdot X_{резv} = 328 \cdot 0,0011 = 0,36 \text{ В} \quad (2.43)$$

Опори 11-тої гармоніки кожного елемента:

1) енергосистема:

$$x_{cv} = \frac{U_2^2}{S_k} \cdot v = \frac{1,5^2}{300} \cdot 11 = 0,0825 \text{ Ом}; \quad (2.44)$$

2) двообмотковий трансформатор:

$$x_{HT1v} = \frac{12v}{S_{HT1}} = \frac{12}{16} \cdot 11 = 8,25 \text{ Ом}; \quad (2.45)$$

$$x_{HT2} = \frac{12v}{S_{HT2}} = \frac{12}{1} \cdot 11 = 132 \text{ Ом}; \quad (2.46)$$

3) батареї конденсаторів:

$$x_{BK1v} = \frac{40}{Q_{BK1} \cdot v} = \frac{40}{5000 \cdot 11} = \frac{0,008}{11} = 0,0007 \text{ Ом}; \quad (2.47)$$

$$x_{BK2v} = \frac{40}{Q_{BK2}} = \frac{40}{400v} = \frac{0,1}{11} = 0,009 \text{ Ом}; \quad (2.48)$$

4) навантаження:

$$x_{H1} = \frac{12v}{S_{H1}} = \frac{12}{7,3} \cdot 11 = 1,64 \cdot 11 = 18,04 \text{ Ом}; \quad (2.49)$$

$$x_{H2} = \frac{12v}{S_{H2}} = \frac{12v}{S_{H2} \cdot K_{3T2}} = \frac{12v}{1 \cdot 0,8} = 15 \cdot 11 = 165 \text{ Ом.} \quad (2.50)$$

Еквівалентний опір схеми заміщення:

$$x_{резv} = (X_{H1v}^{-1} - X_{BK1v}^{-1} + (X_{cv} + X_{HT1v})^{-1} + (X_{HT2} + \frac{X_{H2v} \cdot X_{BK2v}}{X_{H2v} - X_{BK2v}})^{-1})^{-1} =$$

$$= (18,04 - 0,0007 + (0,0825 + 8,25) + (132 + \frac{165 \cdot 0,009}{165 - 0,009})) = 0,0007 \text{ Ом}$$

Розрахункові гармоніки струму перетворювача:

$$I_{vВП} = \frac{S_{ВП}}{\sqrt{3} \cdot U \cdot v} = \frac{6000}{\sqrt{3} \cdot 1.5 \cdot v} = \frac{2300}{11} = 209 \text{ А.} \quad (2.51)$$

Напряга 11-тої гармоніки на секціях шин 1.5 кВ:

$$U_v = I_{vВП} \cdot X_{резv} = 209 \cdot 0.0007 = 0,15 \text{ В} \quad (2.52)$$

Опори 13-тої гармоніки кожного елемента:

1) енергосистема:

$$x_{cv} = \frac{U_2^2}{S_k} \cdot v = \frac{1.5^2}{300} \cdot 13 = 0,0975 \text{ Ом}; \quad (2.53)$$

2) двообмотковий трансформатор:

$$x_{HT1v} = \frac{12v}{S_{HT1}} = \frac{12}{16} \cdot 13 = 9,75 \text{ Ом}; \quad (2.54)$$

$$x_{HT2} = \frac{12v}{S_{HT2}} = \frac{12}{1} \cdot 13 = 156 \text{ Ом}; \quad (2.55)$$

3) батареї конденсаторів:

$$x_{БК1v} = \frac{40}{Q_{БК1} \cdot v} = \frac{40}{5000 \cdot 13} = \frac{0,008}{13} = 0,0006 \text{ Ом}; \quad (2.56)$$

$$x_{БК2v} = \frac{40}{Q_{БК2}} = \frac{40}{400v} = \frac{0,1}{13} = 0,007 \text{ Ом}; \quad (2.57)$$

4) навантаження:

$$x_{H1} = \frac{12v}{S_{H1}} = \frac{12}{7.3} \cdot 13 = 1,64 \cdot 13 = 21,32 \text{ Ом}; \quad (2.58)$$

$$x_{H2} = \frac{12v}{S_{H2}} = \frac{12v}{S_{H2} \cdot K_{ст2}} = \frac{12v}{1 \cdot 0,8} = 15 \cdot 13 = 195 \text{ Ом}. \quad (2.59)$$

Еквівалентний опір схеми заміщення:

$$x_{резv} = (X_{H1v}^{-1} - X_{БК1v}^{-1} + (X_{cv} + X_{HT1v})^{-1} + (X_{HT2} + \frac{X_{H2v} \cdot X_{БК2v}}{X_{H2v} - X_{БК2v}})^{-1})^{-1} = \\ = (21,32 - 0,0006 + (0,0975 + 9,75) + (156 + \frac{195 \cdot 0,007}{195 - 0,007})) = 0,0006 \text{ Ом}$$

Розрахункові гармоніки струму перетворювача:

$$I_{vВП} = \frac{S_{ВП}}{\sqrt{3} \cdot U \cdot v} = \frac{6000}{\sqrt{3} \cdot 1.5 \cdot v} = \frac{2300}{5} = 177 \text{ А.} \quad (2.60)$$

Напруга 13-тої гармоніки на секціях шин 1.5 кВ:

$$U_v = I_{vВП} \cdot X_{резv} = 177 \cdot 0.0006 = 0,1 \text{ В} \quad (2.61)$$

Результати розрахунків гармоніки струму та напруги для $v = 5, 7, 11, 13$, в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 гармоніки струму та напруги

v	x_{cv} Ом	x_{HT1v} Ом	x_{HT2v} Ом	x_{BK1v} Ом	x_{BK2v} Ом	x_{H1v} Ом	x_{H2v} Ом	$x_{резv}$ Ом	$I_{vВП}$ А	U_v В
5	0,0375	3,75	60	0,0016	0,02	8,2	75	0,0016	460	0,74
7	0,0525	5,25	84	0,0011	0,014	11,48	105	0,0011	328	0,36
11	0,0825	8,25	132	0,0007	0,009	18,04	165	0,0007	209	0,15
13	0,0975	9,75	156	0,0006	0,007	21,32	195	0,0006	177	0,1

Коефіцієнт викривлення синусоїдальності кривої напруги:

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum U_v^2}}{U_H} \cdot 100\% = \frac{\sqrt{0,74^2 + 0,36^2 + 0,15^2 + 0,1^2}}{1500} \cdot 100$$

$$= 0,056 \% < 5 \%,$$

що відповідає вимогам ДСТУ EN 50160:2014.

Для шунтування (абсорбції) струмів вищих гармонік застосовуються силові резонансні фільтри (СРФ).

В мережах з шести фазними вентильними перетворювачами достатньо встановити тільки СРФ 5-й та 7-й гармоніки.

Виконую розрахунок фільтрів вищих гармонік.

Вибір батарей конденсаторів для фільтрів:

Орієнтовна потужність батарей конденсаторів фільтрів, що визначається струмом гармоніки:

$$Q_0 = \sqrt{K_c} \cdot 1,2 \cdot U_{н.б.} \cdot I_{v\Sigma} = \sqrt{3} \cdot 1,3 \cdot U_2 \cdot I_{vВП};$$

$$Q_{05} = \sqrt{3} \cdot 1,3 \cdot 1,5 \cdot 460 = 1554 \text{ квар}; \quad (2.62)$$

$$Q_{07} = \sqrt{3} \cdot 1,3 \cdot 1,5 \cdot 328 = 1107 \text{ квар}; \quad (2.63)$$

Потужність батарей конденсаторів фільтрів, що визначається з умови ефективності абсорбції гармоніки:

$$Q_{\text{БК}} S_k \cdot K_p; K = 0,45 \cdot 10^{-2}; \quad (2.64)$$

$$K = 0,25 \cdot 10^{-2};$$

$$Q_{05} = 3748 \text{ квар};$$

$$Q_{07} = 300000,45 \cdot 10^{-2} = 3748 \text{ квар}.$$

Прийняти потужність БК: $Q_{\text{П5}} = 3748 \text{ квар}; Q_{\text{П7}} = 3748 \text{ квар}.$

2.3 Дослідження змін показників якості на математичній моделі

Коефіцієнт ефективності поглинання гармоніки для прийнятої батареї конденсаторів:

$$K_p = \frac{Q_{\text{П}}}{S_k},$$

$$K_{\text{П5}} = \frac{3748}{300000} = 1,25 \cdot 10^{-2}; K_{\text{П7}} = 1,25 \cdot 10^{-2}. \quad (2.65)$$

Розрахунок коефіцієнта, який характеризує підвищення напруги основної частоти на конденсаторах порівняно з напругою на шинах підстанції:

$$\alpha_p = \frac{v^2}{v^2 - 1}; \quad (2.66)$$

$$\alpha_{\text{П5}} = \frac{25}{5^2 - 1} = 1,042, \quad \alpha_{\text{П7}} = \frac{49}{7^2 - 1} = 1,021.$$

Розрахунок коефіцієнта, який характеризує запас по нарузі батарей конденсаторів, з урахуванням номінальної напруги батареї та розрахункової напруги мережі:

$$K_{\text{Н}} = \frac{V_2}{\sqrt{3} \cdot V_{\text{Н.б}}}; \quad (2.67)$$

$$K_{\text{Н}} = \frac{1,5}{\sqrt{3} \cdot 1,8} = 0,48.$$

Перевірка батарей конденсаторів на відсутність перенапруг в усталеному режимі:

$$\alpha p K_H \leq 1 \quad (2.68)$$

$$\alpha p 5 \cdot K_H = 1,042 \cdot 0,48 = 0,5 < 1$$

$$\alpha p 7 \cdot K_H = 1,021 \cdot 0,48 = 0,49 < 1$$

Визначення коефіцієнта, який враховує амплітудно-частотну характеристику мережі, вплив фільтрів на її деформацію та вплив відхилення параметрів фільтра від значень при резонансному налаштуванню:

$$\eta v = \frac{\alpha}{K_1 \cdot K_p \cdot v^2}; \quad (2.15)$$

$K_1 = 1$, $\alpha = -0,02$ – для 5-ої та 7-ої гармоніки;

$$\eta 5 = \frac{-0,02}{0,45 \cdot 10^{-2} \cdot 5^2} = -0,178;$$

$$\eta 7 = \frac{-0,02}{0,45 \cdot 10^{-2} \cdot 7^2} = -0,09.$$

Визначення коефіцієнта завантаження по струму v -ої гармоніки:

$$K_{iv} = \frac{1}{1 + \eta v}; \quad (2.70)$$

$$K_{i5} = \frac{1}{1 + (-0,178)} = 1,22;$$

$$K_{i7} = \frac{1}{1 - 0,09} = 1,1.$$

Перевірка потужності батарей конденсаторів за умовою виключення перевантаження по струму:

$$Q_{\Pi} = \frac{3 \cdot V_{н.б} \cdot I_v \cdot K_{iv}}{1,6 - (\alpha p \cdot K_H)^2} \quad (2.71)$$

$$Q_{\Pi 5} = \frac{3 \cdot 1,8 \cdot 460 \cdot 1,22}{1,6 - (1,042 \cdot 0,48)^2} = 2244 \text{ квар};$$

$$Q_{\Pi 7} = \frac{3 \cdot 1,8 \cdot 328 \cdot 1,1}{1,6 - (1,021 \cdot 0,48)^2} = 1432,3 \text{ квар}.$$

Реактивна потужність, яка видається батареями конденсаторів фільтрів:

$$Q_{\text{вид}} = Q_{\Pi} \cdot (\alpha p \cdot K_H)^2; \quad (2.72)$$

$$Q_5 = 2244 \cdot (1,042 \cdot 0,48)^2 = 561,3 \text{ квар};$$

$$Q_7 = 1432,3 \cdot (1,021 \cdot 0,48)^2 = 344 \text{ квар}.$$

Сумарна потужність 905,3 квар.

Вибір реакторів фільтрів

Визначення ємнісного опору фази батарей конденсаторів:

$$X_{cv} = \frac{3 \cdot V_{н.б.}^2}{Q_{п}}, \quad (2.73)$$

$$X_{c5} = \frac{3 \cdot 1,8^2 \cdot 10^3}{905,3} = 10,7 \text{ Ом};$$

$$X_{c7} = \frac{3 \cdot 1,8^2 \cdot 10^3}{905,3} = 10,7 \text{ Ом}.$$

Визначення індуктивного опору реактора, виходячи з умов резонансу:

$$X_{pv} = \frac{X_{cv}}{v^2}, \quad (2.74)$$

$$X_{p5} = \frac{10,7}{5^2} = 0,43 \text{ Ом};$$

$$X_{p7} = \frac{10,7}{7^2} = 0,218 \text{ Ом}.$$

Номинальний струм реактора:

$$I_{p.н} = \frac{Q_{п}}{\sqrt{3} \cdot V_2}, \quad (2.75)$$

$$I_{p.н5} = \frac{905,3}{\sqrt{3} \cdot 1,5} = 348 \text{ А};$$

$$I_{p.н7} = \frac{905,3}{\sqrt{3} \cdot 1,5} = 348 \text{ А}.$$

Реактивність реактора:

$$X_p = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{p.н} \cdot X_{pv}}{10 \cdot V_{p.н}}, \quad (2.76)$$

$$X_{p5} = \frac{\sqrt{3} \cdot 348 \cdot 0,43}{10 \cdot 1,5} = 17,27\%; \quad X_{p7} = \frac{\sqrt{3} \cdot 348 \cdot 0,218}{10 \cdot 1,5} = 8,76\%.$$

Процент гармонік напруги в мережі після встановлення фільтру:

$$V_{vcp} = V_v \cdot \eta_v \quad (2.77)$$

$$V_{5cp} = 0,74 \cdot 0,178 = 0,13 \text{ В};$$

$$V_{7cp} = 0,36 \cdot 0,09 = 0,03 \text{ В}.$$

Коефіцієнт викривлення синусоїдальності після встановлення фільтрів:

$$(2.78) \quad K_U = \frac{\sqrt{V_{5cp}^2 + V_{7cp}^2}}{1500} \cdot 100\% = \frac{\sqrt{0,13^2 + 0,03^2}}{1500} = 8,9 \cdot 10^{-3}. \quad (2.15)$$

Таблиця 2.3 - Пасивні фільтри для 5,7 гармонік серії PNF

Модель	PHF-470G (V5)	PHF-320G (V7)
Напруга (В змінного струму)	480	480
Струм (А)	470	320
Коефіцієнт гармонійних спотворень (%)	>5	>5
Висота індуктора (мм)	420	380
Ширина індуктора (мм)	660	610
Довжина індуктора (мм)	600	480
Висота групи конденсаторів (мм)	670	350
Ширина групи конденсаторів (мм)	382	320
Довжина групи конденсаторів (мм)	300	334
Вага (кг)	40	33

Фільтри гармонік (PHF) - це додаткові фільтри, які встановлюються на лінії живлення навантаження. Продуктивність пасивних фільтрів гармонік серії IREM PHF дуже висока: Фільтри PHF спеціально розроблені для придушення гармонік струму, споживаємого 6-імпульсними силовими перетворювачами. В основному це пасивні фільтри на основі послідовно- паралельно з'єднаних котушок індуктивності та конденсаторів. (Основна функція полягає у фільтрації 5-ї та 7-ї гармонік струму та зниження рівня 11-ї та 13-й гармонік струму). За допомогою фільтрів PHF можна знизити рівень повного коефіцієнта гармонік (I) до значень нижче 8%, що більше, ніж за простого скорочення вхідного дроселя. При повному навантаженні повний коефіцієнт гармонік (I) скорочується до 5% та нижче.

Пасивні фільтри частіше підключаються до окремих навантажень в системі, а не до загальної точки з'єднання, оскільки для застосування потрібне послідовне навантаження для ефективного зменшення гармонік.

Пасивний фільтр гармонік встановлюється послідовно з лінією, тому його слід обирати відповідно до струму, поглинання

навантаження або за групою навантажень. Пасивні гармонічні фільтри IREM гарантують чудове загасання і їх не потрібно налаштовувати з урахуванням параметрів імпедансу місця установки.

3 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАХОДІВ НОРМАЛІЗАЦІЇ ЯКОСТІ НАПРУГИ

В цій роботі проводиться аналіз нелінійних навантажень та вплив активних фільтрів на якість напруги у електричних мережах.

Питання побудови та реконструкції мереж електропостачання набуло як найбільшої актуальності в умовах повномасштабного вторгнення, коли через пошкодження інфраструктури постає виклик з її відбудови.

В цьому розділі проводиться розрахунок капітальних та експлуатаційних витрат.

Проектні капіталовкладення визначаються за формулою:

$$K_{\text{пр}} = K_{\text{об}}(\sum_{i=1}^k \cdot C_i) + Z_{\text{тсз}} + Z_{\text{м}} + Z_{\text{пр}},$$

де $K_{\text{об}}(\sum_{i=1}^k \cdot C_i)$ – вартість придбання електрообладнання;

k – кількість необхідних комплектуючих елементів;

$Z_{\text{тсз}}$ – транспортно-заготівельні і складські витрати;

$Z_{\text{м}}$ – витрати на монтажні роботи;

$Z_{\text{пр}}$ – інші одноразові вкладення грошових коштів.

Вартість придбання необхідних комплектуючих елементів представлена у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 Зведення капітальних витрат

№ з/п	Найменування технічних засобів		Кількість	Ціна за одиницю	Сума, грн
1	Фільтри гармонік (PHF)	PHF-470G	4	45000	180000
		PHF-320G	4	42000	168000
2	реактор	РОСЗ-1000/07 УЗ	2	70000	140000
Разом:					488000

Розрахунок транспортно-складських витрат:

$$Z_{\text{тсз}} = n \cdot T = 10 \cdot 500 = 5000 \text{ грн}; \quad (3.1)$$

де n 10 – кількість місць в ттн, маса обладнання – 2 тон, ;

T – тариф 500 , грн/1місце;

l – відстань перевезення, виконується з Києва до Кривого Рогу.
 $l=485$ км;

Розрахунок монтажних витрат:

$$Z_M = T_M \cdot N_{\text{год}} = 750 \cdot 40 = 30000 \text{ грн} \quad (3.2)$$

де T_M – тариф на монтаж , грн/год;

$N_{\text{год}}$ – кількість затраченого часу;

Інших одноразових витрат не передбачено.

Загальні капітальні витрати:

$$K_{\text{пр}} = K_{\text{об}}(\sum_{i=1}^K \cdot C_i) + Z_{\text{тсз}} + Z_M = 488000 + 5000 + 30000 = 523000 \text{ грн}; \quad (3.3)$$

Визначення експлуатаційних витрат

Основні статті експлуатаційних витрат:

1. Амортизаційні відрахування (C_a).
2. Заробітна плата обслуговуючого персоналу (C_z).
3. Відрахування на соціальне страхування (C_c).
4. Витрати на технічне обслуговування і поточний ремонт обладнання і мереж (C_T).
5. Вартість електроенергії, що буде споживана об'єктом проектування або втрат електроенергії (C_e).
6. Інші витрати ($C_{\text{пр}}$).

Таким чином, річні експлуатаційні витрати складають:

$$C = C_a + C_z + C_c + C_T + C_e + C_{\text{пр}} =$$

Фільтри гармонік і реактор не мають постійного обслуговуючого персоналу, тому C_z та C_c дорівнює нулю. АНФ «активні гармонічні компенсатори» усувають гармоніки за рахунок створення зворотної форми хвилі, яка компенсує спотворення та немає власного електроспоживання. Тому, C_e буде дорівнювати сумі втрат в електричній енергії в мережі електропостачання.

Розрахунок амортизаційних відрахувань

Розрахунок амортизаційних відрахувань робиться прямолінійним методом амортизації.

$$\Phi_a = \Phi_{\text{п}} - Л$$

де $\Phi_{\text{п}}$ – первісна вартість об'єкта основних засобів;

$Л$ – розрахункова ліквідаційна вартість основних засобів.

Так, як визначити ліквідаційну вартість досить складно, L приймається рівною нулю.

Норма амортизації постійна та дорівнює:

$$H_a = \frac{\Phi_n - L}{\Phi_n \cdot T_n} \cdot 100\% = \frac{523000}{2615000} \cdot 100\% = 20\% \quad (3.4)$$

де T_n – термін корисного використання, років. $T_n = 5$ років для об'єкта з найбільшим економічним терміном використання.

Річні амортизаційні відрахування АО за прямолінійним методом:

$$AO = \frac{\Phi_n}{T_n \cdot 100} = \frac{523000}{5 \cdot 100} = 1046 \text{ грн}; \quad (3.5)$$

Визначення річних втрат на технічне обслуговування і поточний ремонт. Річні витрати на технічне обслуговування і поточний ремонт електротехнічного обладнання включають витрати на матеріали, запасні частини, заробітну плату ремонтним робітникам і можуть визначатися за фактичними даними підприємства.

Визначається за формулою:

$$C_T = \sum_{i=1}^K (R_i \cdot t_i \cdot m_i \cdot R_{\Sigma i} + \frac{S_i \cdot \Pi_i}{T_i} \cdot T_\Phi) = (750 \cdot 6 \cdot 2 + 570 \cdot 4) = 11280 \text{ грн}; \quad (3.6)$$

де n – число пристроїв автоматики, що підлягають ремонту;

R_i – годинна ставка робітників, що виконують ремонт, грн;

t_i – трудомісткість одного ремонту при категорії складності ремонту в одну ремонтну одиницю залежно від виду ремонту год./од, середня трудомісткість – 10,9 при m_i наведених нижче;

m_i – число ремонтів за рік (число малих ремонтів - 2, середніх - 1, капітальних - 0,1);

$R_{\Sigma i}$ – сумарна категорія складності ремонту в залежності від виду електрообладнання:

S_i - вартість однотипних замінних елементів, грн.;

Π_i – кількість однотипних замінних елементів;

T_i – середній термін служби деталей даного типу, год.;

T_Φ – число годин роботи апаратури на рік, год.

Розрахунок собівартості втрат електричної енергії

Вартість втрат електричної енергії розраховується за формулою:

$$C_e = W_p \cdot C_e;$$

де W_p – кількість втрат електричної енергії за рік, кВт · год;

C_e – тариф на електроенергію, грн/кВт.

Кількість втрат електричної енергії за рік розраховується за формулою:

$$W_p = \Delta P_{\Sigma л} \cdot \tau_{нб} + \Delta P_{обм} \cdot \tau_{нб} + \Delta P_{xx} \cdot T_{Г} = 40 \cdot 2433 + 4,47 \cdot 2433 + 2,31 \cdot 8760 = 128431,1 \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (3.7)$$

де $\Delta P_{\Sigma л}$ – сумарні втрати активної потужності в лініях, кВт;

$T_{Г}$ – кількість годин в році, год.

$$\tau_{нб} = (0,124 + \frac{T_{нб}}{10^4})^2 \cdot 8760 = 2433 \text{ год.} \quad (3.8)$$

Вартість втрат електричної енергії:

$$C_e = W_p \cdot C_e = 128431,1 \cdot 7,5/1000 = 963,23 \text{ тис. грн./рік} \quad (3.9)$$

Термін окупності:

$$PP = \frac{C}{CF} = \frac{523000}{963230} = 0,543 \approx 6.5 \text{ місяців} \quad (3.10)$$

C – Початкові інвестиційні витрати;

CF – середньорічний чистий грошовий потік (прибуток + амортизація що генерує проект).

ВИСНОВКИ

Побудова мережі електропостачання 10-1,5 кВ з активними фільтрами, а саме трансформаторної підстанції, АФ та кабельних ліній що відходять від нього до розподільчих пристроїв споживачів, потребує великих одноразових капіталовкладень. Це пояснюється дороговизною обладнання. Проте, незважаючи на великі капіталовкладення при спорудженні системи електропостачання, її не можна назвати дорогою. Завдяки великому терміну використання обладнання мережі та відсутності постійного персоналу, витрати на амортизаційні відрахування та технічне обслуговування є незначними. Найбільші річні експлуатаційні витрати припадають на втрати електричної енергії в мережі. Окрім економії за оплату електричної енергії ми ще отримуємо позитивні економічні ефекти у вигляді зменшення старіння ізоляції, довший строк служби трансформаторів і можливість модернізації обладнання тягових агрегатів на сучасне з мікропроцесорним керуванням, яке потребує відповідність міжнародним стандартам електромагнітної сумісності.



Рисунок 3.1 – Електронне обладнання в кабіні ОПЕ1АМ, для виконання всіх режимів експлуатації

У зв'язку із стрімким розвитком електроніки, застосуванням високотехнологічного та енергозберігаючого обладнання, підвищенням вимог до безпосереднього поліпшення умов праці локомотивної бригади, стало безумовним впровадження цих напрямків при ремонті промислового тягового рухомого складу в якості модернізації для поліпшення його техніко- енергетичних характеристик.

Незважаючи на те, що ці електровози мають великий фізичний знос і морально застаріли, вони далі використовуються на багатьох підприємствах. Для продовження їх терміну експлуатації виконують

капітальний ремонт по документації заводу виробника. Відновлений таким чином електровоз працює, але реалізація сучасних вимог до більшості технічних характеристик можлива тільки при проведенні модернізації.

На тягових агрегатах ОПЕ1АМ, ОПЕ1БМ крім виконання модернізації в частині покращення умов праці локомотивної бригади — модернізація інтер'єру кабіни, встановлюється електронне обладнання, для виконання всіх режимів експлуатації. Це нові випрямлячі, що регулюють напругу на трансформаторі та виконують секціонування виводів вторинної обмотки. Натомість з електровоза управління вилучають електричний контактор груповий ЕКГ21 та блоки напівпровідникових випрямлячів БПВ-6000-У2.

В обсяг модернізації тягових агрегатів серій ПЕ2м, ПЕ2у, ОПЕ1АМ, ОПЕ1БМ також врахована заміна існуючих поршневих компресорів на компресора роторно-пластинчатого або гвинтового типу, а також електродвигунів вентиляторів постійного струму на асинхронні.

Модернізація кар'єрних агрегатів передбачає поліпшення їх тягових характеристик, зниження експлуатаційних витрат, збереження їх надійності та терміну служби.

4 ПЕРЕЛІК ГРАФІЧНОГО (ДЕМОНСТРАЦІЙНОГО) МАТЕРІАЛУ

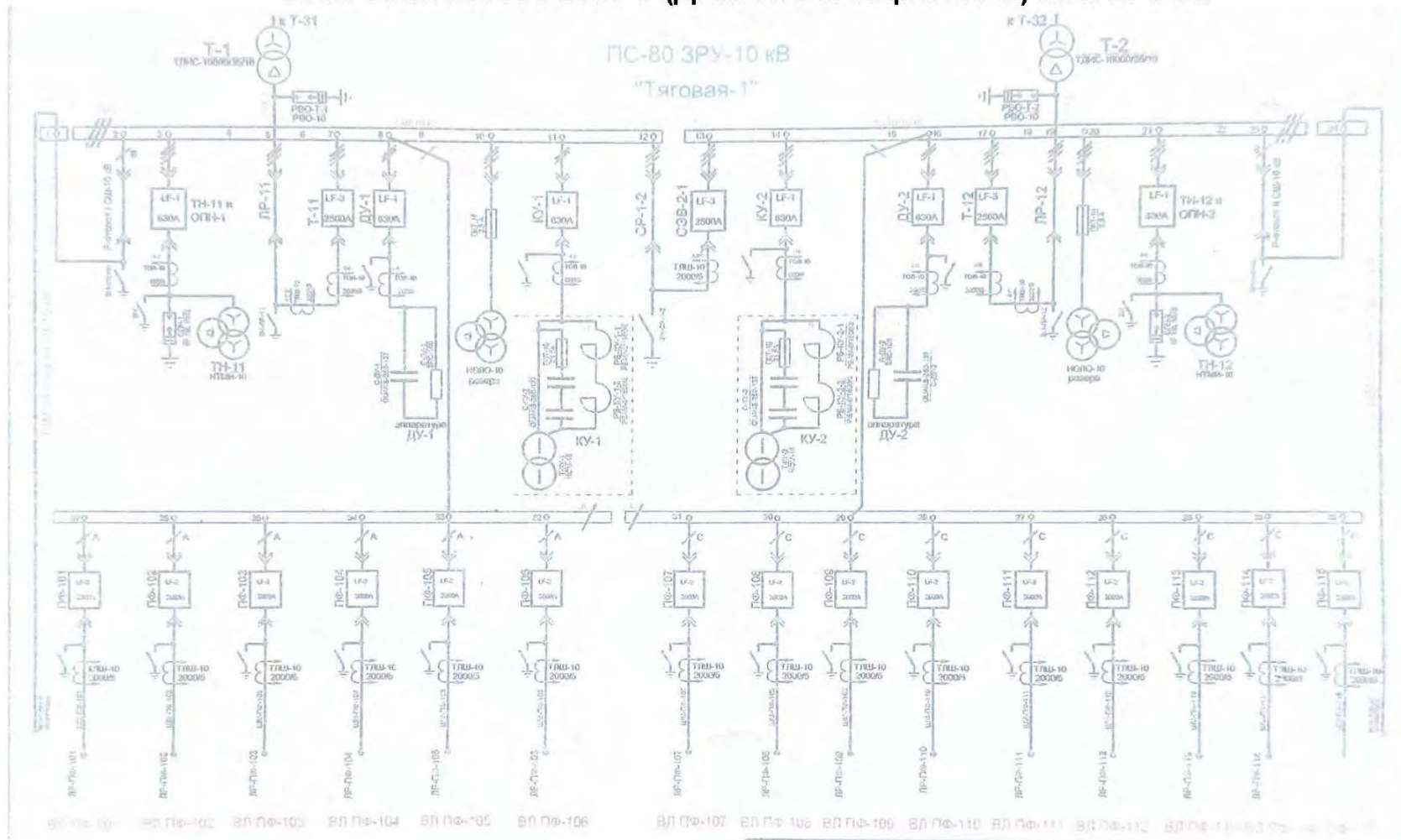


Рисунок 4.1 – Однолінійна схема живлення тягової мережі



Рисунок 4.2 – Схема живлення тягової мережі однофазного струму за допомогою трифазного трансформатора зі схемою з'єднання Y/Δ -11 (обмотка для живлення нетягового навантаження не зображена)

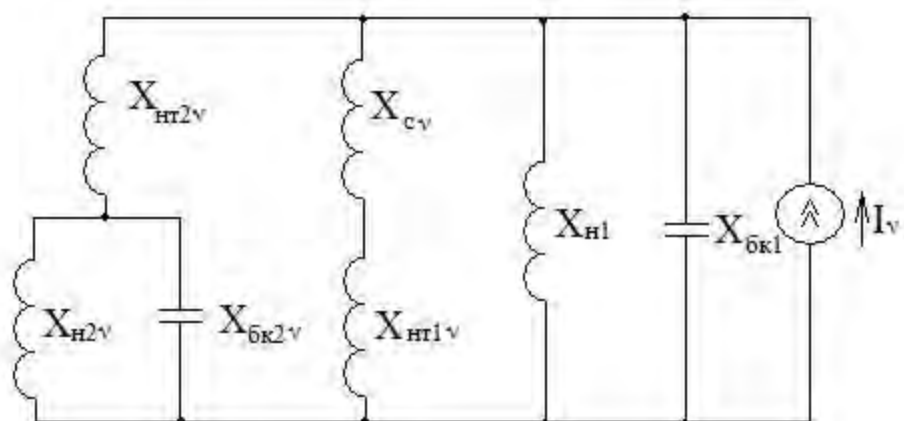


Рисунок 4.3 – Схема заміщення для розрахунків показників якості напруги

Таблиця 4.1 – Параметри ФКУ

Модель	PHF-470G (V5)	PHF-320G (V7)
Напруга (В змінного струму)	480	480
Струм (А)	470	320
Коефіцієнт гармонійних спотворень (%)	>5	>5
Висота індуктора (мм)	420	380
Ширина індуктора (мм)	660	610
Довжина індуктора (мм)	600	480
Висота групи конденсаторів (мм)	670	350
Ширина групи конденсаторів (мм)	382	320
Довжина групи конденсаторів (мм)	300	334
Вага (кг)	40	33

Результати нормалізації показників якості напруги:

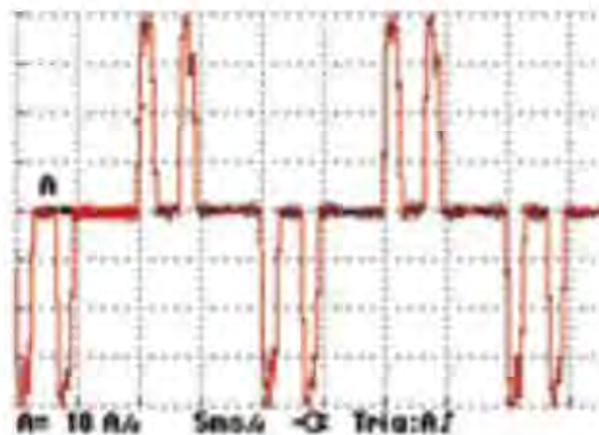


Рисунок 4.4 – Перетворювач без фільтра

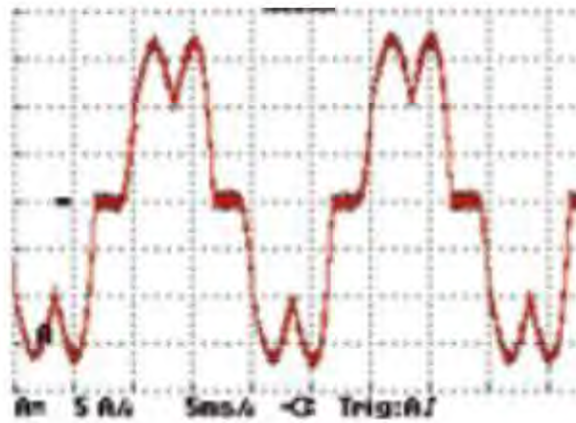


Рисунок 4.5 – перетворювач без дроселя

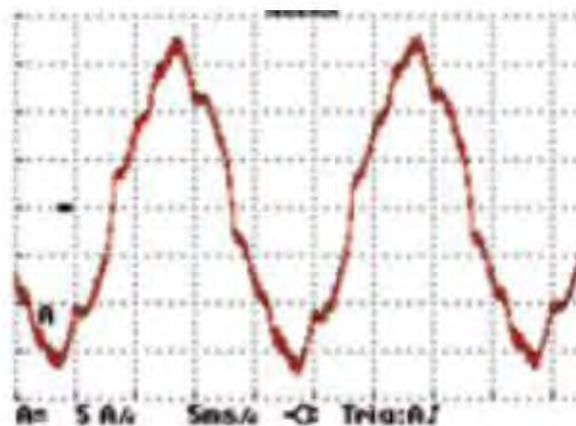


Рисунок 4.6 – Перетворювач з фільтром РНФ

Система оперативного струму забезпечує живлення ланцюгів керування і сигналізації. Використовуються трансформатор власних потреб ТСН тип ТН100/35 на 0,4 кВ змінного струму(рис.4.7) і з шин СШ1,2 0,4кВ через ІБЖ1,2 постійний струм 220В 6А на рубильники секціонування(рис.4.8).

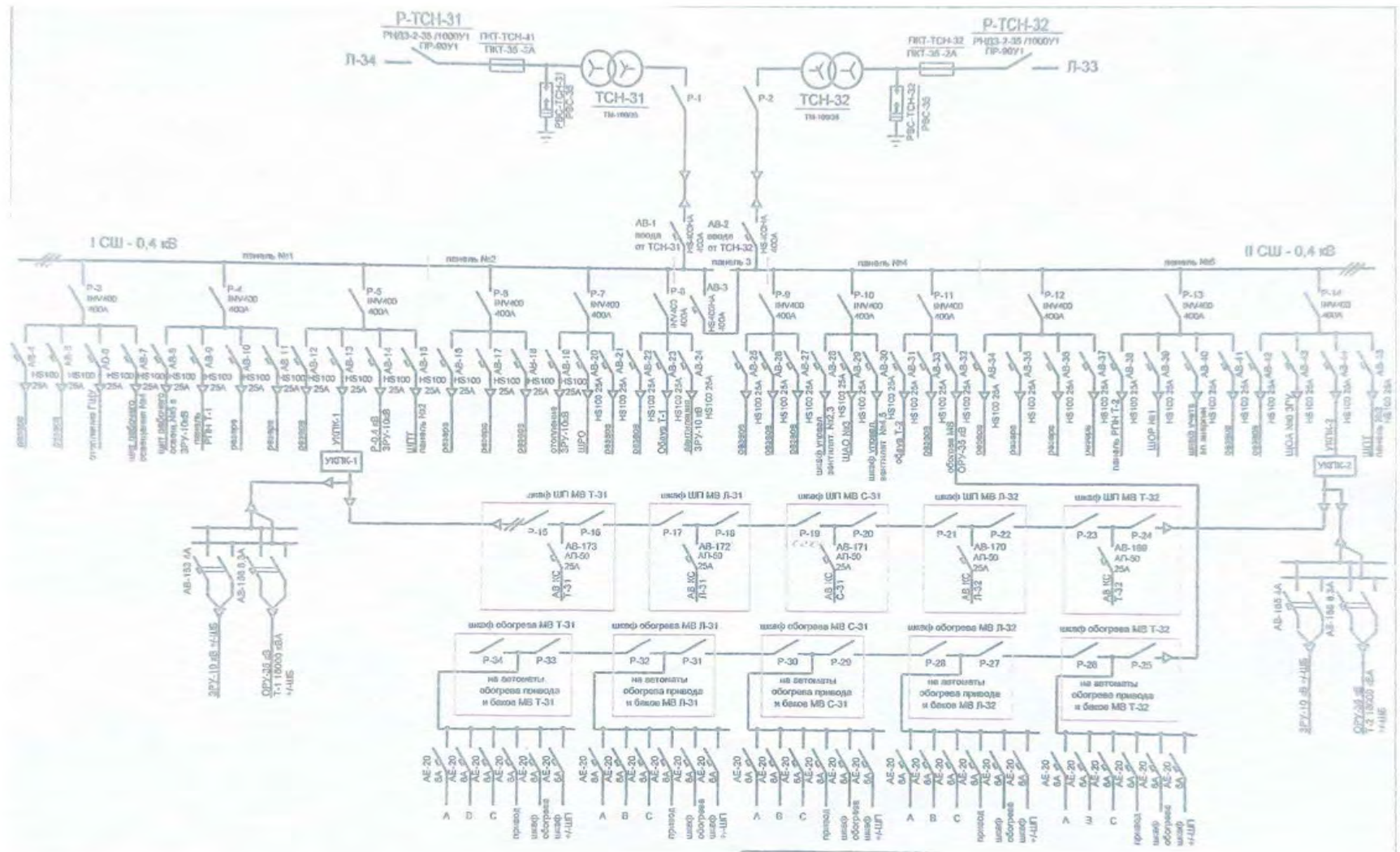


Рисунок 4.7 – Система оперативного змінного струму 0,4 кВ

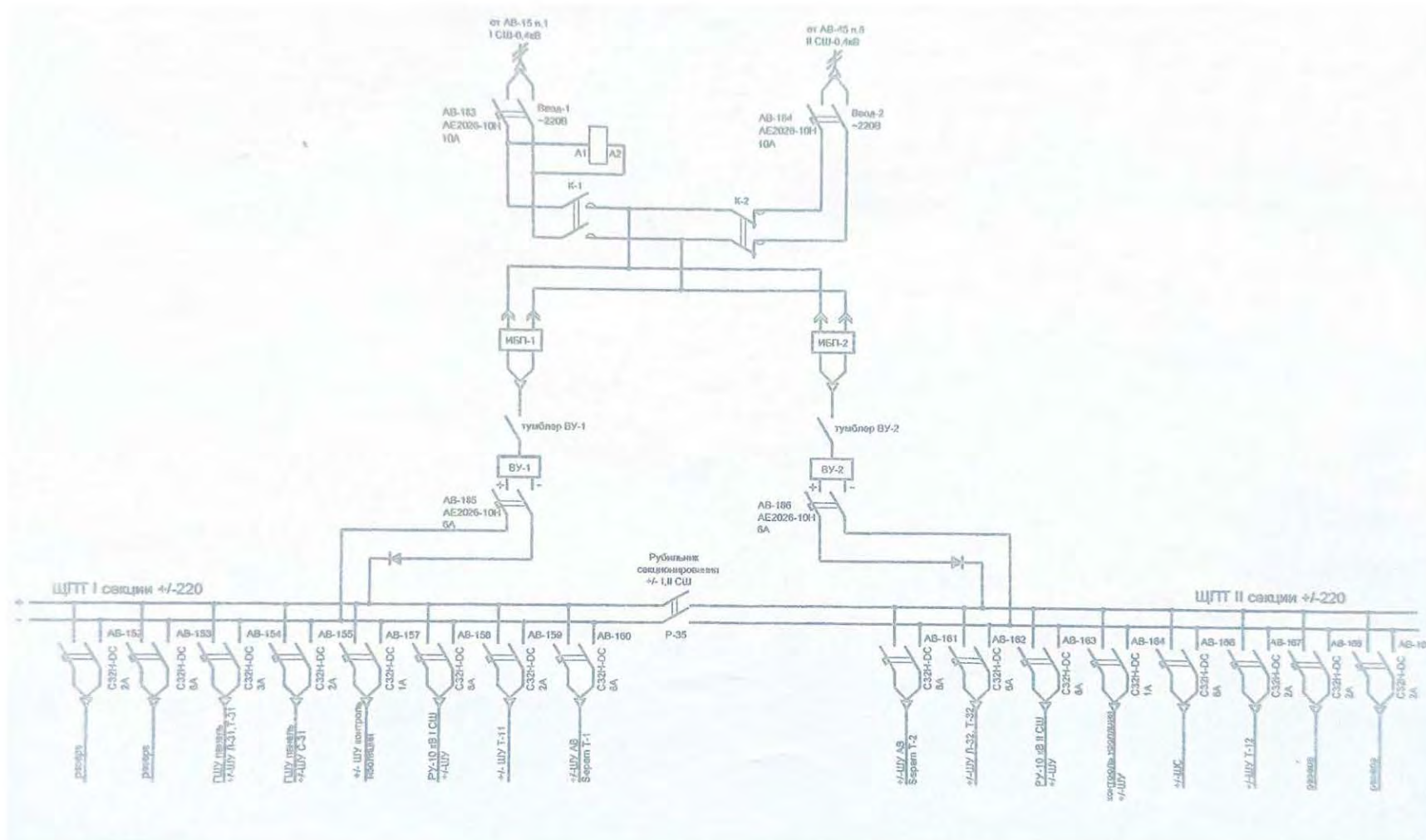


Рисунок 4.8 – Система оперативного постійного струму 220 В

Конденсаторні батареї.

Призначені для створення реактивної потужності, нестача якої в тяговій мережі, різко знижує коефіцієнт потужності тягового навантаження.

В мережі де працюють електродвигуни в мережу включені конденсаторні установки, для того щоб не було струмових втрат. При запуску електровозів або при підйомі на керівний уклон 0.045 (45 метрів вертикального підйому на кожні 1000м шляху) з повністю завантаженими вагонами електровоз споживає значну потужність $P \geq 5 \text{ МВт}$.

В електродвигунах наводиться ЕРС що перешкоджає проходженню струму. Тут напруга U випереджає струм I на 90° . А в конденсаторах I випереджає U на 90° . При підключенні в тягову мережу конденсаторів різниця між струмом і напругою $\approx 0^\circ$, а $\cos \varphi \approx 1$.

КУ представляє собою потужну конденсаторну батарею і включений послідовно з нею реактор. Паралельно з конденсаторною батареєю підключений ТН НОМ-15, слугуючий розрядним опором при відключенні батареї. Первинна обмотка фаза А (С) і В, вторинна обмотка закорочена. Фаза В підключається на реактор, а з реактора на конденсаторну батарею. КУ складається з LF, реактора, конденсаторів. В роботі дві фази АВ або СВ. Фаза В приходить шинами через РБ, однофазний ТН НОМ-15 на один вивід конденсатора. Робоча фаза А або С з LF шинами через запобіжники на інший вивід конденсатора. Запобіжники на 31.5А слугують захистом конденсаторів від переструмів. Конденсатори підключені по два штуки послідовно. Всього 10 пар конденсаторів. РБ слугує для захисту КБ від к.з. які виникають в контактній мережі.

Конденсатори(UAKS 21-11/250) $f_H - 50 \text{ Гц}$, $C_H - 6.6 \text{ мкФ}$, $U_H - 11 \text{ кВ}$, $I_H - 22.7 \text{ А}$, $Q_H - 250 \text{ кВАр}$.

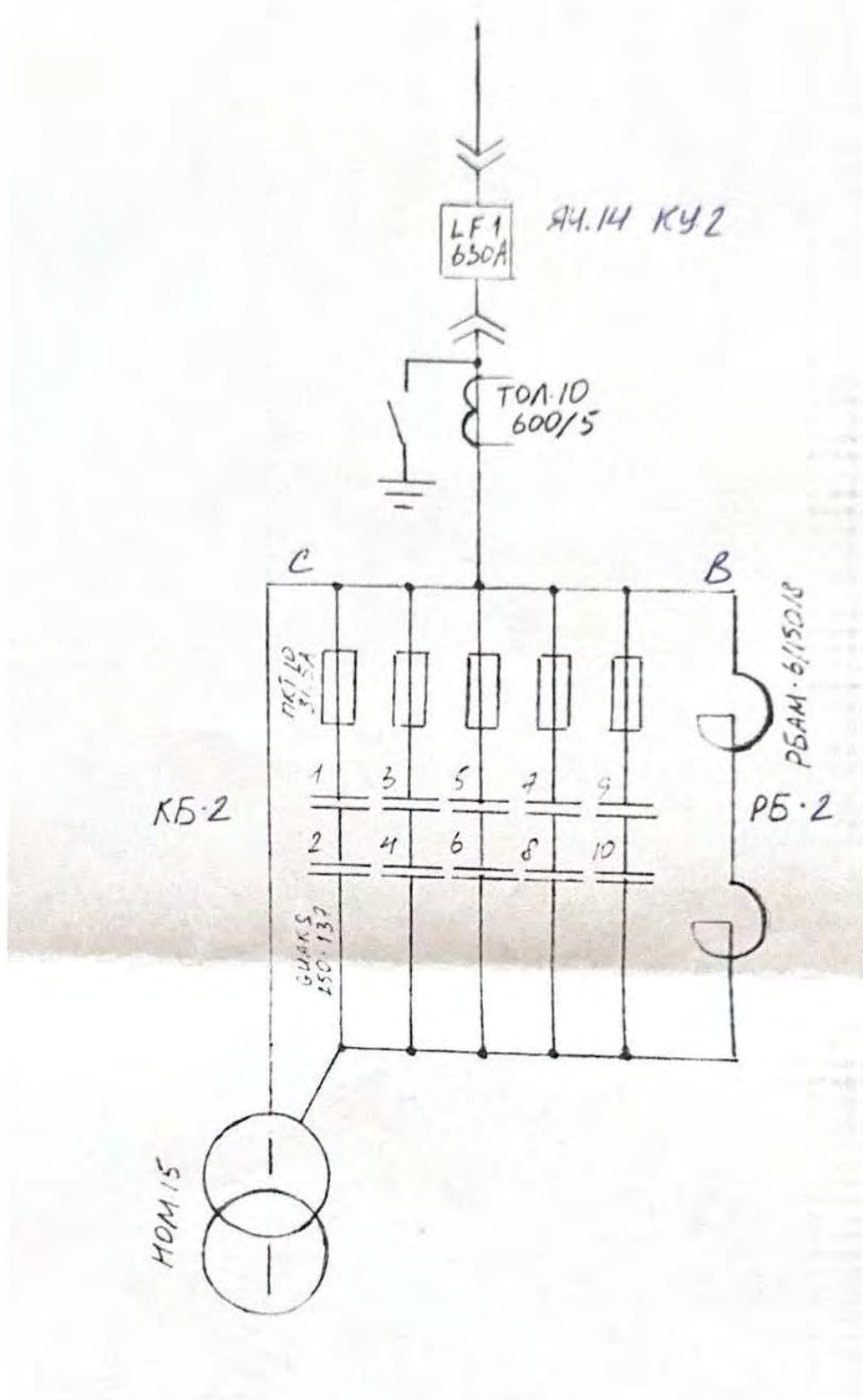


Рисунок 4.9 – Схема конденсаторної батареї.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1) Внутрішня документація Інгулецького ГЗК (дата звернення: 15.12.2025).
- 2) Pons E., Tommasini R., Colella P. Electrical safety of DC urban rail traction systems // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2016. – Vol. 52, No. 6. – P. 4759–4767. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7555618/> (дата звернення: 01.01.2026).
- 3) Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими: за заг. ред. акад. НАН України О.В. Кириленка / Інститут електродинаміки НАН України. – К.: Ін-т електродинаміки НАН України, 2016. – 400 с.
- 4) Жежеленко І.В. Електромагнітна сумісність у системах електропостачання:
- 5) Підручник / І.В. Жежеленко, А.К. Шидловський, Г.Г. Півняк, Ю.Л. Саенко. – Д.: Нац. гірнич. ун-т, 2009. – 319 с.: іл.
- 6) Півняк Г.Г., Жежеленко І.В., Трофімов Г.Г., Папаїка Ю.А. Реактивна потужність
- 7) в електричних мережах. – Д.: НТУ «ДП», 2020. – 72 с.
- 8) Півняк Г.Г., Жежеленко І.В., Папаїка Ю.А. Енергетична ефективність систем
- 9) електропостачання. – Д.: НТУ «ДП», 2018. – 149 с.
- 10) Kosobudzki, G., Rogoza, M., Lysenko, O., Papaika, Y. (2018). Frequency and Parametric Characteristics of Direct Current Pulse Conversion Filter of a Contactless Locomotive. 14 th Selected Issues of Electrical Engineering and Electronics (WZEE).
- 11) <https://doi.org/10.1109/WZEE.2018.8748987>. (дата звернення: 09.01.2026).
- 12) Papaika, Yu.A., Lysenko, O.H., Koshelenko, Ye.V., Olishkevskiy, I.H. (2021). Mathematical modeling of power supply reliability at low voltage quality. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2021,

- (2), pp. 97–103. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-2/097>. (дата звернення: 13.01.2026).
- 13) Ремонт Кар'єрних Електровозів Львівський локомотиворемонтний завод – URL: <https://lvivlrz.com/vl40.php> (дата звернення: 10.01.2026).
- 14) PASSIVE FILTERS FOR HARMONICS PHF SERIES – URL: <https://plimtex.com.ua/wp-content/uploads/2020/08/IREM-PASSIVE-FILTERS.pdf> (дата звернення: 11.01.2026).
- 15) ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального призначення. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2014.