

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»

Інститут Електроенергетики
(інститут)

Електротехнічний факультет
(факультет)

Кафедра електроенергетики
(повна назва)

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
кваліфікаційної роботи ступеню магістра
(бакалавра, спеціаліста, магістра)

студента Товстика Олександра Анатолійовича
(ПІБ)

академічної групи 141М-21з-1
(шифр)

спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код і назва спеціальності)

за освітньо-професійною програмою Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(офіційна назва)

на тему: **«Розробка заходів забезпечення умов електромагнітної сумісності несиметричного та нелінійного промислового навантаження»**
(назва за наказом ректора)

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка за шкалою		Підпис
		рейтинговою	інституційною	
кваліфікаційної роботи	проф. Папаїка Ю.А.			
розділів:				
Спеціальний	проф. Папаїка Ю.А.			
Економічний	доц. Тимошенко Л.В.			
Рецензент				
Нормо-контролер	доц. Олішевський Г.С.			

Дніпро
2022

ЗАТВЕРДЖЕНО:
завідувач кафедри
електроенергетики
(повна назва)

_____ Папаїка Ю.А.
(підпис) (прізвище, ініціали)

« _____ » _____ 20 ____ року

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу
ступеня магістра
(бакалавра, спеціаліста, магістра)

Студенту Товстику О.А. академічної групи 141М-21з-1
(прізвище та ініціали) (шифр)
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

за освітньо-професійною програмою Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(офіційна назва)

на тему: **«Розробка заходів забезпечення умов електромагнітної сумісності несиметричного та нелінійного промислового навантаження»**

затверджену наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від _____ № _____

Розділ	Зміст	Термін виконання
<i>Спеціальний</i>	ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ	12.10.22-25.10.22
	РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РОЗРАХУНКУ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ НАПРУГИ ТА ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ	26.10.22-01.12.22
<i>Економічний</i>	ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ПРОЕКТУ ЗАСТОСУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ ЗАХОДІВ НА ВИРОБНИЦТВІ	02.12.22-14.12.22

Завдання видано _____
(підпис керівника)

Папаїка Ю.А.
(прізвище, ініціали)

Дата видачі _____

Дата подання до екзаменаційної комісії _____

Прийнято до виконання _____
(підпис студента)

Товстик О.А.
(прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Об'єкт досліджень – електромагнітні процеси в електричних розподільних мережах промислового підприємства.

Предмет досліджень – показники якості напруги та втрат електроенергії в електричних мережах.

Мета кваліфікаційної роботи – проаналізувати залежність втрат електроенергії від показників якості напруги.

Вихідні дані для проведення роботи – електричні принципові схеми, графіки електричних навантажень трансформаторних підстанцій, нормативні документи з якості електроенергії.

Наукова новизна – розробка науково обгрунтованої залежності втрат електроенергії від параметрів якості напруги.

Практична цінність полягає у розробці способу визначення показників енергетичної ефективності при наявності несиметрії та несинусоїдальності в електричній мережі.

Економічний ефект від реалізації результатів роботи очікується позитивним завдяки зменшенню втрат енергії в системах електропостачання.

Соціальний ефект від реалізації результатів роботи очікується позитивним завдяки зменшенню викидів парникового газу в атмосферу при меншій кількості виробленої електроенергії.

ВТРАТИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ, ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ,
СИЛОВІ ТРАНСФОРМАТОРИ, КАБЕЛЬНІ ЛІНІЇ, ЕФЕКТИВНІСТЬ
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

ЗМІСТ

Вступ.....	
ОСНОВНА ЧАСТИНА.....	
1. Причини виникнення нелінійних та несиметричних електромагнітних завад.....	
2. Аналіз системи електропостачання підприємства.....	
2.1 Розрахунок несиметрії.....	
2.2 Розрахунок несинусоїдальності.....	
2.3 Порівняння розрахункових показників якості напруги зі стандартними.....	
3. АНАЛІЗ ШКІДЛИВОГО ВПЛИВУ НЕСИМЕТРІЇ ТА НЕСИНУСОЇДАЛЬНОСТІ НАПРУГИ НА СЕП ПІДПРИЄМСТВА	
3.1 Вплив несиметрії напруги на СЕП.....	
3.2 Вплив несинусоїдальності напруги на СЕП.....	
4. РОЗРОБКА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ НАПРУГИ.....	
4.1 Заходи для зниження несиметрії.....	
4.2 Вибір реактора фільтру.....	
4.3. Розрахунок фільтро-компенсуючих пристроїв	
5. РОЗРАХУНОК ДОДАТКОВИХ ВТРАТ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ	
6. РОЗРАХУНОК РІЧНИХ ЗБИТКІВ В ЕНЕРГОСИСТЕМІ УКРАЇНИ ВІД НЕЯКІСНОЇ НАПРУГИ НАБЛИЖЕНИМ МЕТОДОМ ЕКСПЕРТНИХ ОЦІНОК.....	
7. Обґрунтування установки в мережах 0,4 та 6 кВ фільтрів гармонік компанії «NOKIAN CAPACITORS».....	
8. Заходи з автоматичного регулювання рівнів напруги.....	
9. Обґрунтування застосування активних фільтрів.....	
10. Релейний захист конденсаторних батарей.....	

ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	
1. Розрахунок капітальних витрат.....	
2. Розрахунок експлуатаційних витрат.....	
2.1 Розрахунок амортизаційних відрахувань.....	
2.2 Розрахунок річного фонду заробітної плати.....	
2.3. Розрахунок відрахувань на соціальні заходи.....	
2.4. Визначення інших витрат.....	
2.5. Розрахунок вартості спожитої електроенергії.....	
Висновки.....	
Список літератури.....	
Додаток.....	

ВСТУП

Забезпечення якості електроенергії, що вимагається ДСТУ 13109-97 або бажаної за умовами економічності є однією з головних задач проектування, так як робота всіх електроприймачів та апаратів найбільш доцільна з технічної та економічної точки зору при номінальних параметрах. Низька якість електроенергії в мережі призводить до збільшення втрат електроенергії, скороченню термінів служби обладнання, технологічному збитку, який складається зі зниження продуктивності, погіршення якості продукції, що випускається. Втрати потужності в мережі та в електрообладнанні також змінюються в залежності від значення напруги. Наприклад, навантажувальні втрати, тобто втрати у повздовжній частині схеми заміщення ліній та трансформаторів пропорційні квадрату струму та зворотно пропорційні квадрату напруги ($\Delta P = 3I^2 \cdot r_i = \frac{S^2}{U^2} \cdot r_i$); втрати холостого ходу пропорційні квадрату напруги. Тому, регулюючи напругу можна змінювати втрати потужності та електроенергії в елементах мережі. Отже змінюються умови роботи системи електропостачання. При цьому може знадобитися встановлення додаткових конденсаторних батарей, зміна схеми електропостачання, застосування додаткових пристроїв. Від своєчасного проведення цих заходів залежить якість електроенергії в мережі та техніко-економічні показники її роботи.

Головна мета даної роботи – розробити найбільш економічні та ефективні заходи по нормалізації якості напруги, які дозволяють покращити якість електроенергії у споживачів та одночасно підвищити надійність роботи електричних мереж та безпечність їх обслуговування і ремонту.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

1. Причини виникнення нелінійних та несиметричних електромагнітних завад

Симетрична трифазна система напруг характеризується однаковими за модулем та фазою напругами в трьох фазах. При несиметричних режимах напруги в різних фазах не рівні.

Несиметричні режими в електричних мережах виникають з наступних причин:

- неоднакові навантаження в різних фазах;
- неповнофазна робота ліній або інших елементів в мережі;
- різні параметри ліній в різних фазах.

Найбільш часто несиметрія напруг виникає через нерівності навантажень фаз. У міських та сільських мережах 0,38 кВ несиметрія напруг викликається в основному підключенням однофазних освітлювальних і побутових електроприймачів (ЕП) малої потужності. Кількість таких однофазних ЕП велике, і їх потрібно рівномірно розподіляти за фазами для зменшення несиметрії.

У мережах високої напруги (більше 1 кВ) несиметрія викликається, як правило, наявністю потужних однофазних електроприймачів, а в ряді випадків і трифазних електроприймачів з неоднаковим споживанням в фазах. До останніх відносяться дугові сталеплавильні печі. Основні джерела несиметрії в промислових мережах 0,38-10 кВ - це однофазні термічні установки, руднотермічні печі, індукційні плавильні печі, печі опору та різні нагрівальні установки. Крім того, несиметричні ЕП - це зварювальні апарати різної потужності. Тягові підстанції електрифікованого на змінному струмі залізничного транспорту є потужним джерелом несиметрії, так як електровози - однофазні ЕП. Потужність окремих однофазних ЕП в даний час досягає декількох мегават.

Неповнофазна робота елементів мережі викликається короткочасним відключенням однієї або двох фаз при коротких замиканнях (КЗ). Одиночну

лінію можна обладнати пристроями пофазного управління, які відключають пошкоджену фазу лінії в тих випадках, коли дія АПВ виявляється неуспішною через стійке КЗ.

У переважній більшості стійкі КЗ однофазні. При цьому відключення пошкодженої фази призводить до зберігання двох інших фаз лінії в роботі.

Неповнофазні режими можуть виникати й при відключенні трансформаторів.

У деяких випадках для групи, складеної з однофазних трансформаторів, при аварійному відключенні однієї фази може виявитися допустимим електропостачання по двох фазах. В цьому випадку не потрібна установка резервної фази, особливо при наявності двох груп однофазних трансформаторів на підстанції (ПС).

Нерівність параметрів ліній по фазах має місце, наприклад, при відсутності транспозиції на лініях або подовжених її циклах. Транспозиційні опори ненадійні й є джерелами аварій. Зменшення числа таких опор на лінії підвищує її надійність. Проте в цьому випадку погіршується вирівнювання параметрів фаз лінії, для якої зазвичай і застосовується транспозиція.

Основною причиною несинусоїдальності є наявність вентильних перетворювальних установок та електроприймачів з нелінійною вольт-амперною характеристикою (ВАХ). Основний вплив надають вентильні перетворювачі, які в даний час широко застосовуються в промисловості й на транспорті.

Найбільш поширені вентильні перетворювачі на напівпровідниках (тиристорні перетворювачі), потужність яких весь час зростає. Вентильні перетворювачі широко застосовуються для перетворення змінного струму в постійний і використовуються в якості джерел живлення на металургійних заводах для термічних установок, на хімічних заводах і підприємствах кольорової металургії для електролізних установок, на машино-будівельних та інших підприємствах для установок електродугового і контактного зварювання. Випускаються тиристорні перетворювальні агрегати потужністю до 12 МВт для

автоматизованих електроприводів постійного струму - широко використовуються в промисловості.

Тиристорні перетворювачі використовуються в перетворювачах частоти, в різного роду пристроях. Вентильні перетворювачі застосовуються для живлення електрифікованої залізничного, а також внутрішньо-заводського і міського транспорту.

ЕП з нелінійною вольт-амперною характеристикою - це, наприклад, газорозрядні лінії (ртутні і люмінесцентні), поширені в промислових і міських мережах.

В енергосистемах в лініях постійного струму, а також у вставках, призначених для паралельної роботи енергосистем з різною частотою використовуються вентильні перетворювачі змінного струму в постійний і навпаки. В енергосистемах застосовують струмообмещуючі пристрої і джерела реактивної потужності (ДРП), що використовують тиристорні перетворювачі.

Джерелами несинусоїдальності в енергосистемах можуть бути також генератори або трансформатори при роботі їх на нелінійній частині кривої намагнічування. Як правило, генератори і трансформатори працюють при відносно невисокому насиченні сталі, тобто на лінійній частині кривої намагнічування, і створювані ними вищі гармоніки настільки малі, що їх можна не враховувати.

У загальному випадку джерела несинусоїдальності виявляються включеними несиметрично, наприклад тягові підстанції залізниць, електрифіковані на змінному струмі, а також дугові сталеплавильні печі. При цьому підключаються до мережі однофазні перетворювачі, кожен з яких регулюється за власним навантаженням. У цих випадках треба враховувати спільно й несинусоїдальність, й несиметрію напруг та струмів.

2. Аналіз системи електропостачання підприємства

В даній кваліфікаційній роботі розглядається схема промислового підприємства Метінвест Каметсталь.

Живлення електричною енергією здійснюється через два трансформатори ГПП типу ТРДН-40000/150, потужністю по $S_{HT} = 40$ МВА. До кожного з них зі сторони 6 кВ підключена секція шин (1 СШ та 2 СШ).

До 1 СШ підключені:

- шість цехових трансформаторів ТМ-1600/6/0,4, кожний яких з потужністю $S_{ц.т} = 1600$ кВА;

- п'ять асинхронних двигунів Siemens 1LA8457-4PC, кожний з яких з активною потужністю $P_{Ад} = 1$ МВт;

- дугова вакуумна піч з потужністю $S_{ДВП} = 7$ МВА;

- піч електрошлакового переплаву з потужністю $S_{ПЕШП} = 15$ МВА;

- перетворювач з номінальною потужністю $S_{ПР} = 12$ МВА;

- конденсаторна батарея з реактивною потужністю $Q_{бк} = 11$ Мвар;

- навантаження Н1, потужністю $S_{Н1} = 8$ МВА.

До 2 СШ підключене тільки навантаження Н2 з потужністю $S_{Н2} = 21$ МВА.

В цій схемі головним джерелом несиметрії є однофазна піч електрошлакового переплаву (ПЕШП).

Джерелом ж несинусоїдальності являється 6-фазний перетворювач, який підключений через трансформатор перетворювача з номінальною потужністю $S_{НОМ.Т} = 16$ МВА.

2.1 Розрахунок несиметрії

Розрахунок ґрунтується на використанні схеми заміщення зворотної послідовності мережі.

Схема заміщення для струмів зворотної послідовності аналогічна схемі прямої послідовності; всі елементи схеми вводять своїми опорами зворотної

послідовності. Несиметричне навантаження являє собою джерело струму зворотної послідовності (рис.1).

Розрахунки показників несиметрії ведеться в точках К1, К2 та К3.

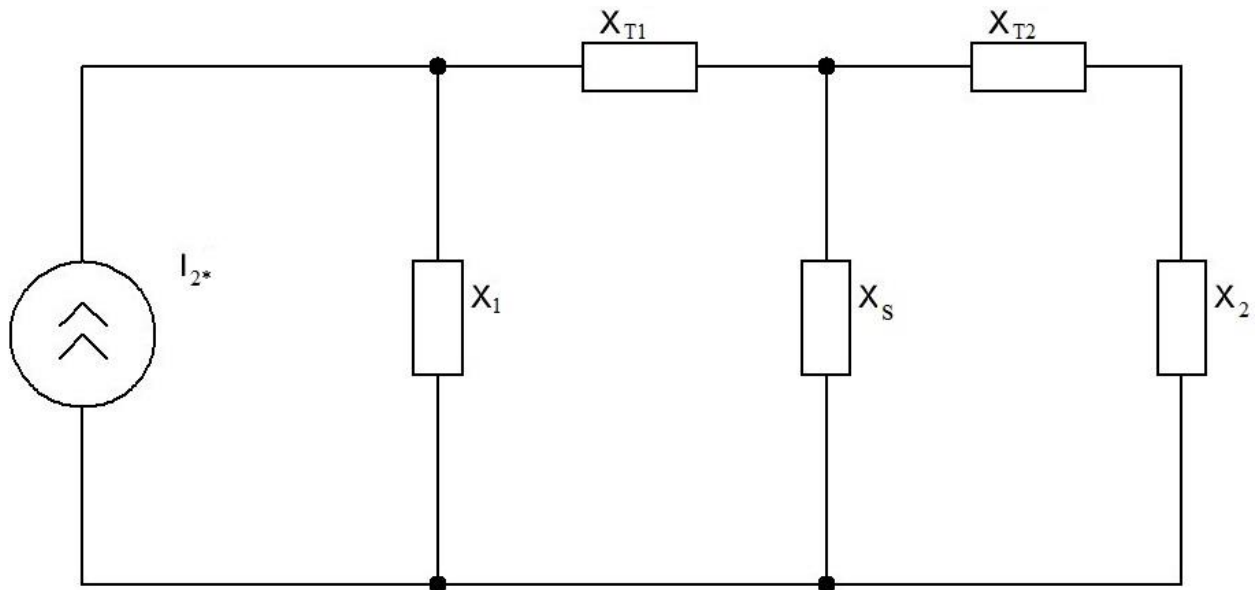


Рис.1. Схема заміщення ПЕШП

Модуль опору для точки К1 знаходиться за формулою:

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

де: $S_{\text{НОМ}i}$ – повна потужність i -ого приєднання; y_i – відносна провідність i -ого приєднання; ϕ – фазовий кут лінійного та нелінійного навантаження.

$$Z_{2\Sigma^*} = \frac{\sqrt{(7 \cdot 0,7 + 15 \cdot 0,7)^2 + (7 \cdot 0,71 + 15 \cdot 0,71 - 12 \cdot 1)^2}}{\sqrt{(7 \cdot 0,5 \cdot 0,7 + 15 \cdot 1 \cdot 0,7)^2 + (7 \cdot 0,5 \cdot 0,71 + 15 \cdot 1 \cdot 0,71 - 12 \cdot 1 \cdot 1)^2}} = 1,217$$

Для перетворювачів кут перетворення дорівнює 90° , тому: $\cos\phi = 0, \sin\phi = 1, y_* = 1$.

Аргумент опору зворотної послідовності:

$$\arg Z_{2\Sigma^*} = \arctg \frac{\sum_{i=1}^n S_{\text{НОМ}i} \cdot y_{*i} \cdot \sin\phi}{\sum_{i=1}^n S_{\text{НОМ}i} \cdot y_{*i} \cdot \cos\phi}$$

$$\arg Z_{2\Sigma^*} = \arctg \frac{S_{\text{НОМДВП}} \cdot y_{*\text{ДВП}} \cdot \sin\phi_{\text{ДВП}} + S_{\text{НОМПЕШП}} \cdot y_{*\text{ПЕШП}} \cdot \sin\phi_{\text{ПЕШП}} - S_{\text{НОМПР}} \cdot y_{*\text{ПР}} \cdot \sin\phi_{\text{ПР}}}{S_{\text{НОМДВП}} \cdot y_{*\text{ДВП}} \cdot \cos\phi_{\text{ДВП}} + S_{\text{НОМПЕШП}} \cdot y_{*\text{ПЕШП}} \cdot \cos\phi_{\text{ПЕШП}} - S_{\text{НОМПР}} \cdot y_{*\text{ПР}} \cdot \cos\phi_{\text{ПР}}}$$

$$\arg Z_{2\Sigma^*} = \arctg \frac{7 \cdot 0,5 \cdot 0,71 + 15 \cdot 1 \cdot 0,71 - 12 \cdot 1 \cdot 1}{7 \cdot 0,5 \cdot 0,7 + 15 \cdot 1 \cdot 0,7 - 12 \cdot 1 \cdot 0} = \arctg(1,195) = 50^\circ$$

$$\sin(\arg Z_{2\Sigma^*}) = \sin(\arctg(0,47)) = 0,7668$$

Повний опір зворотної послідовності для точки К1 складає:

$$\dot{Z}_{2(K1)} = 1,217 + j0,7668$$

Для розрахунку опорів елементів схеми заміщення приймаємо базисні умови:

- базисна потужність: $S_6 = 100$ МВА
- відносні опіри трансформаторів Т1 та Т2:

$$X_{T1^*} = X_{T2^*} = \frac{u_k}{100\%} \cdot \frac{S_6}{S_{HT}} = \frac{10,5\%}{100\%} \cdot \frac{100}{32} = 0,328$$

- відносний опір системи: $X_{S^*} = S_6/S_{кз} = 100/1600 = 0,0625$

Повний опір зворотної послідовності для точки К2 складає:

$$\dot{Z}_{2(K2)} = \dot{Z}_{2^*} \cdot \frac{S_6}{S_{H2}}$$

де: \dot{Z}_{2^*} – відносний повний опір зворотної послідовності навантаження Н2, S_{H2} – повна потужність навантаження Н2, МВА.

$$\dot{Z}_{2(K2)} = (0,7 + j0,9) \cdot \frac{100}{21} = 3,33 + j4,28$$

Струм джерела струму зворотної послідовності:

$$I_{2^*} = I_{*2} \cdot \frac{S_{ПЕШП}}{S_6} = 1,7 \cdot \frac{15}{100} = 0,21$$

де: I_{*2} – відносне значення струму зворотної послідовності.

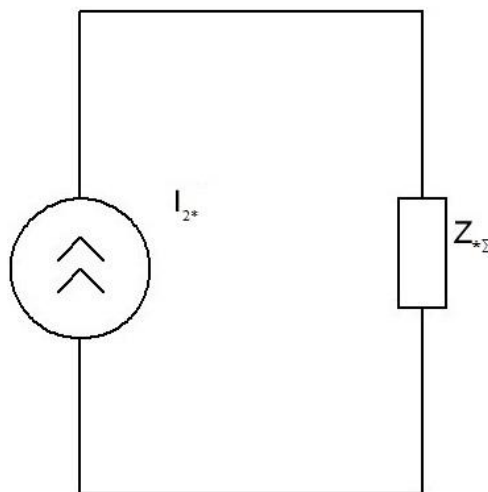


Рис. 2. Спрощена схема заміщення зі складеними опорами

Точка К1:

Сумарний еквівалентний опір зворотної послідовності:

$$\dot{Z}_{*2\Sigma(K1)} = \frac{\dot{Z}_{2(K1)} \cdot \left[jX_{T1*} + \frac{jX_{S*} \cdot (jX_{T2*} + \dot{Z}_{2(T2)})}{jX_{S*} + jX_{T2*} + \dot{Z}_{2(T2)}} \right]}{\dot{Z}_{2(K1)} + jX_{T1*} + \frac{jX_{S*} \cdot (jX_{T2*} + \dot{Z}_{2(T2)})}{jX_{S*} + jX_{T2*} + \dot{Z}_{2(T2)}}$$

$$\dot{Z}_{*2\Sigma(K1)} = \frac{(1,217 + j0,7668) \cdot \left[j0,328 + \frac{j0,00625 \cdot (j0,328 + 3,33 + j4,28)}{j0,00625 + 0,328 + 3,33 + j4,28} \right]}{1,217 + j0,7668 + j0,328 + \frac{j0,00625 \cdot (j0,328 + 3,33 + j4,28)}{j0,00625 + 0,328 + 3,33 + j4,28}}$$

$$= 0,05 + j0,289$$

Коефіцієнт несиметрії для точки К1:

$$K_{2U(K1)} = |\dot{Z}_{2\Sigma(K1)}| \cdot I_2 = \sqrt{0,05^2 + 0,289^2} \cdot 0,21 = 0,0616 = 6,16 \%$$

Точка К3:

Опір зворотної послідовності:

$$\dot{Z}_{*2\Sigma(K3)} = \frac{jX_{S*} \cdot (jX_{T2*} + \dot{Z}_{2(T2)})}{jX_{S*} + jX_{T2*} + \dot{Z}_{2(T2)}}$$

$$\dot{Z}_{*2\Sigma(K3)} = \frac{j0,00625 \cdot (j0,328 + 3,33 + j4,28)}{j0,00625 + j0,328 + 3,33 + j4,28} = 0,000004 + j0,0062$$

Струм зворотної послідовності в трансформаторі Т1:

$$I_{2(T1)} = I_2 \cdot \left| \frac{\dot{Z}_{2(T1)}}{\dot{Z}_{2(T1)} + jX_{T1*} + \frac{(jX_{T2*} + \dot{Z}_{2(T2)}) \cdot jX_{S*}}{jX_{T2*} + \dot{Z}_{2(T2)} + jX_{S*}}} \right|$$

$$I_{2(T1)} = 0,21 \cdot \left| \frac{1,217 + j0,7668}{1,217 + j0,7668 + j0,328 + \frac{(j0,328 + 3,33 + j4,28) \cdot j0,00625}{j0,328 + 3,33 + j4,28 + j0,00625}} \right| = 0,24$$

Коефіцієнт несиметрії для точки К3:

$$K_{2U(K3)} = |\dot{Z}_{2\Sigma(K3)}| \cdot I_{2(T1)} = \sqrt{0,000004^2 + 0,0062^2} \cdot 0,24 = 0,0149 = 1,49 \%$$

Точка К2:

Опір зворотної послідовності:

$$\dot{Z}_{*2\Sigma(K2)} = \dot{Z}_{2(K2)} = 3,33 + j4,28$$

Струм зворотної послідовності в трансформаторі Т2:

$$I_{2(T2)} = I_{2(T1)} \cdot \left| \frac{jX_{S^*}}{jX_{S^*} + jX_{T2^*} + \dot{Z}_{2(K2)}} \right|$$

$$I_{2(T2)} = 0,24 \cdot \left| \frac{j0,0625}{j0,0625 + j0,328 + 3,33 + j4,28} \right| = 0,0026 \text{ A}$$

Коефіцієнт несиметрії для точки К2:

$$K_{2U(K2)} = |\dot{Z}_{2\Sigma(K2)}| \cdot I_{2(T2)} = \sqrt{3,33^2 + 4,28^2} \cdot 0,0026 = 0,0141 = 1,41 \%$$

2.2 Розрахунок несинусоїдальності

Визначаємо коефіцієнти викривлення синусоїдальності кривої напруги (K_U) в точках К1, К2, К3 та порівнюємо їх значення з нормами ГОСТ.

Для 6-фазної схеми випрямлення у викривленому спектрі враховують 5-у, 7-у, 11-у та 13-у гармоніки.

Зазвичай для зниження K_U до нормованих значень достатньо абсорбувати гармоніку найменшої частоти, у даному випадку – 5-у гармоніку.

Складаємо схему заміщення (рис.3).

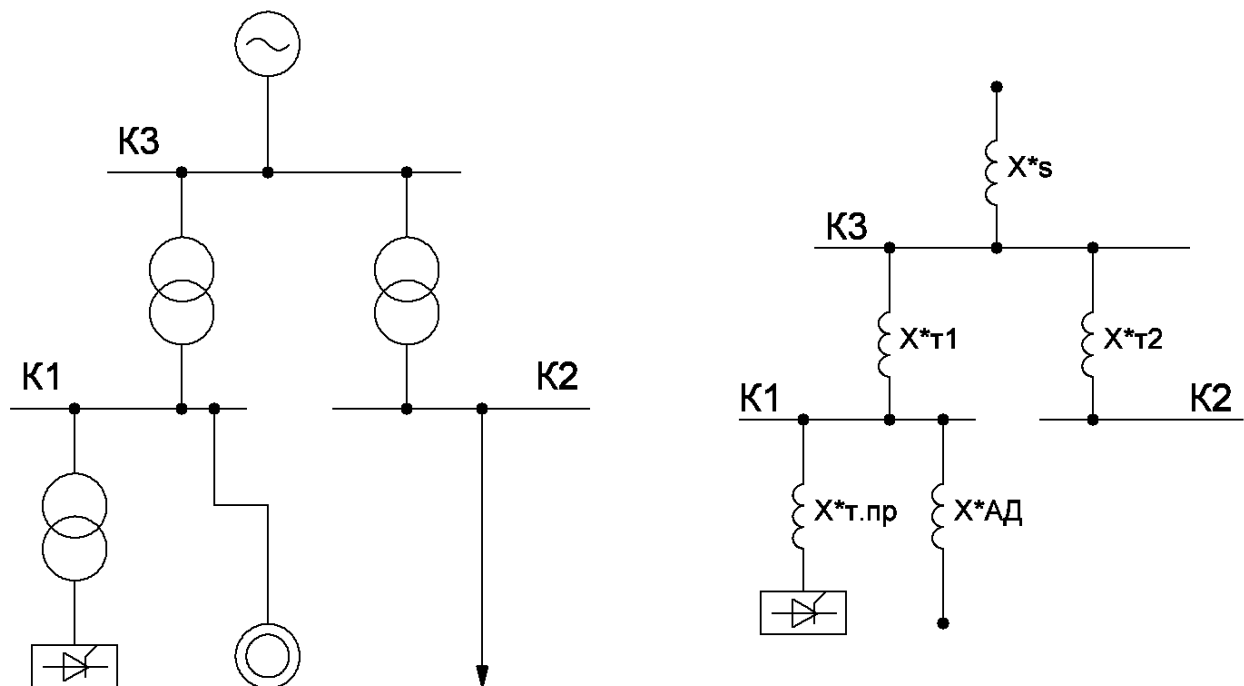


Рис. 3. Схема заміщення 6-фазного перетворювача

Для розрахунку опорів елементів схеми заміщення приймаємо базисні умови:

- базисна потужність: $S_6 = 100 \text{ МВА}$
- відносний опір системи: $X_{*S} = S_6/S_{кз} = 10/1600 = 0,00625$
- відносні опори трансформаторів Т1 та Т2:

$$X_{*Т1} = X_{*Т2} = \frac{u_k}{100\%} \cdot \frac{S_6}{S_{HT}} = \frac{10,5\%}{100\%} \cdot \frac{10}{40} = 0,0328$$

- відносний опір трансформатора перетворювача:

$$X_{*Т.пр} = \frac{u_k}{100\%} \cdot \left(1 + \frac{K_\phi}{4}\right) \cdot \frac{S_6}{S_{НОМ.Т.пр}}$$

де: K_ϕ – коефіцієнт фазності (для 6-фазної схеми випрямлення $K_\phi = 0$),

$S_{НОМ.Т.пр}$ – номінальна потужність трансформатора перетворювача, МВА.

$$X_{*Т.пр} = \frac{14\%}{100\%} \cdot \left(1 + \frac{0}{4}\right) \cdot \frac{100}{16} = 0,0875$$

- відносний опір асинхронних двигунів:

$$X_{*АД} = X_d'' \cdot \frac{S_6}{(P_{НОМ АД} \cdot n_{АД})/\cos\phi_{АД}}$$

де: X_d'' – зверхперехідний опір двигунів, $P_{НОМ АД}$ – активна потужність одного асинхронного двигуна, МВт, $n_{АД}$ – кількість асинхронних двигунів.

$$X_{*АД} = 0,12 \cdot \frac{10}{\frac{1 \cdot 5}{0,85}} = 0,282$$

Еквівалентуємо схему відносно точки К1 (рис. 4):

- перший етап:

$$X_{*Z} = \frac{X_{*S} \cdot X_{*Т2}}{X_{*S} + X_{*Т2}} = \frac{0,00625 \cdot 0,0328}{0,00625 + 0,0328} = 0,0525$$

- другий (фінальний) етап:

$$X_{*C} = \frac{(X_{*Z} + X_{*Т1}) \cdot X_{*АД}}{X_{*Z} + X_{*Т1} + X_{*АД}} = \frac{(0,0525 + 0,0328) \cdot 0,282}{0,0525 + 0,0328 + 0,282} = 0,0655$$

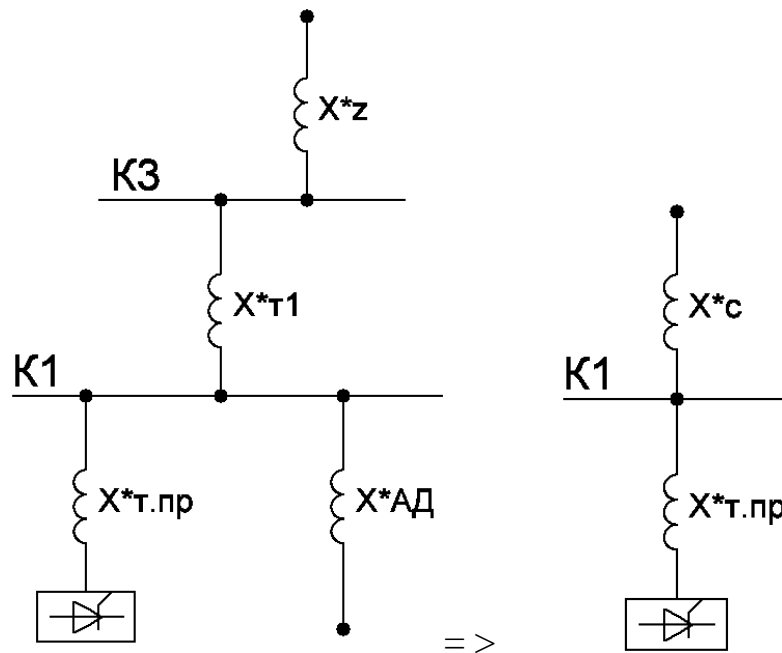


Рис. 4. Спрощена схема заміщення зі складеними опорами: а – перший етап, б – другий етап

Коефіцієнт викривлення синусоїдальності кривої напруги в точці К1:

$$K_{U_{K1}} = X_{*c} \cdot \sqrt{\frac{3}{\pi} \cdot \frac{\sin\phi}{X_{*c} + X_{*T.пр}} - \frac{9}{\pi^2}}$$

$$\sin\phi = \arccos(0,8) = 0,6$$

$$K_{U_{K1}} = 0,0665 \cdot \sqrt{\frac{3}{3,14} \cdot \frac{0,6}{0,0665 + 0,0875} - \frac{9}{3,14^2}} = 0,111 = 11,1 \%$$

Знаючи K_U в точці К1, знаходимо його в інших двох точках системи:

- в точці К3:

$$K_{U_{K3}} = K_{U_{K1}} \cdot \frac{X_{*z}}{X_{*T1} + X_{*z}}$$

$$K_{U_{K3}} = 0,111 \cdot \frac{0,0525}{0,0328 + 0,0525} = 0,068 = 6,8 \%$$

- в точці К2:

$$K_{U_{K2}} = K_{U_{K3}} \cdot \frac{X_{*T2}}{X_{*T2} + X_{*s}}$$

$$K_{U_{K2}} = 0,068 \cdot \frac{0,0328}{0,0328 + 0,00625} = 0,057 = 5,7 \%$$

2.3. Порівняння розрахункових показників якості напруги зі стандартними

Коефіцієнт несиметрії (K_{2U}) для точки К1:

- > 4% - за українським стандартом ГОСТ 13109-97;
- > 2% - за європейським PN-EN-61000).

Для інших двох точок (К2 та К3) цей коефіцієнт нормальний. Проте все ж таки треба встановити конденсаторні батареї (БК).

Коефіцієнт викривлення синусоїдальності кривої напруги (K_U) для всіх точок більше 5% - нормально-допустимий режим. Він має бути не:

- > 5% - за українським стандартом ГОСТ 13109-97;
- > 8% - за європейським PN-EN-61000).

Тому треба встановити фільтро-компенсуючі пристрої (ФКП).

3. АНАЛІЗ ШКІДЛИВОГО ВПЛИВУ НЕСИМЕТРІЇ ТА НЕСИНУСОЇДАЛЬНОСТІ НАПРУГИ НА СЕП ПІДПРИЄМСТВА

3.1. Вплив несиметрії напруги на СЕП

Поява напруг зворотної та нульової послідовності (U_2 та U_0) призводить до додаткових втрат потужності і енергії, а також втрат напруги в мережі, що погіршує режими і техніко-економічні показники її роботи.

Накладення U_2 та U_0 призводить до різних додаткових відхилень напруги в різних фазах. В результаті, напруги можуть вийти за допустимі межі.

Несиметрія негативно позначається на робочих і техніко-економічних характеристиках обертових електричних машин.

В асинхронних двигунах (АД) виникають додаткові втрати в статорі. У ряді випадків доводиться при проектуванні збільшувати номінальну потужність електродвигунів, якщо не вживати спеціальних заходів по симетруванню напруги.

У синхронних машинах крім додаткових втрат і нагріву статора і ротора можуть початися небезпечні вібрації. Через несиметрії скорочується термін служби ізоляції трансформаторів. Синхронні двигуни та батареї конденсаторів (БК) зменшують вироблення реактивної потужності (Q).

Сумарний збиток, обумовлений несиметрією в промислових мережах, включає вартість додаткових втрат електроенергії, збільшення відрахувань на реновацію від капітальних витрат, технологічний збиток, збиток, обумовлений зниженням світлового потоку ламп, встановлених у фазах зі зниженою напругою, і скороченням терміну служби ламп, встановлених у фазах з підвищеною напругою, збиток через зменшення реактивної потужності, що генерується БК й синхронними двигунами.

Несиметрія напруг характеризується коефіцієнтом зворотної послідовності напруг і коефіцієнтом нульової послідовності напруг та нормальне й максимальне допустимі значення яких складають 2% та 4% відповідно.

3.2. Вплив несинусоїдальності напруги на СЕП

Вплив на роботу мереж, електрообладнання та електроприймачів полягає в наступному:

- з'являються додаткові втрати в електричних машинах, трансформаторах і мережах, а також додаткові відхилення напруги;
- обмежується компенсація реактивної потужності за допомогою БК;
- скорочується термін служби ізоляції електричних машин і апаратів;
- погіршується робота пристроїв автоматики, телемеханіки і зв'язку.

Вищі гармоніки напруг і струмів призводять до додаткових (завжди позитивних) відхилень напруги у приймачів.

Гармоніки відносно низьких порядків ($v \leq 7$) в найбільшій мірі впливають на додаткові втрати потужності і енергії в електричних машинах і в лініях електричних мереж.

Відповідно з ГОСТ 1282-79Е, БК можуть довго працювати при перевантаженні їх струмами вищих гармонік не більше ніж на 30%; допустиме

підвищення напруги становить 10%. Однак при тривалій експлуатації БК навіть в цих допустимих умовах термін їх служби скорочується, оскільки наявність вищих гармонік в кривій напруги, навіть в допустимих межах, призводить до інтенсифікації процесу старіння діелектрику конденсаторів.

БК мають відносно малі опори для вищих гармонік, так як $X_C = 1/\omega C$, а чим вище номер гармоніки, тим більше ω ; БК періодично виявляються в режимі, близькому до резонансу струмів на частоті будь-якої з гармонік; внаслідок систематичних перевантажень вони швидко виходять з ладу.

Несинусоїдальність напруг викликає прискорене старіння ізоляції електричних машин, трансформаторів і кабелів в основному в результаті підвищеного нагріву, а також із-за виникнення і протікання в ізоляції іонізаційних процесів, що обумовлюють її старіння при високих частотах електричного поля. Для електричних машин, трансформаторів і кабелів найбільш суттєвим є теплове старіння ізоляції.

Наявність вищих гармонік струмів й напруг суттєво збільшує похибки активних і реактивних лічильників індукційного типу. Перешкоди, викликані вищими гармоніками, можуть привести до погіршення роботи пристроїв автоматики, телемеханіки і зв'язку як на промислових підприємствах, так і в енергосистемах. Гармоніки струму, проникаючи в мережі енергосистем, призводять до погіршення роботи високочастотного зв'язку і систем автоматики, а також викликають помилкові спрацьовування деяких релейних захистів.

Несинусоїдальність напруг і струмів викликає порушення технологічних процесів в більшій мірі, ніж всі інші параметри якості електроенергії.

Збиток через несинусоїдальності струмів і напруг в основному обумовлений додатковими втратами потужності і скороченням терміну служби ізоляції електрообладнання (в першу чергу електродвигунів).

4. РОЗРОБКА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ НАПРУГИ

4.1 Заходи для зниження несиметрії

Оскільки показники несиметрії для точки К1 перевищують максимально допустимі значення, необхідно розпочати технічні заходи для зниження несиметрії. Одним із таких заходів для зниження несиметрії, найбільш доступних і широко розповсюджених, є нерівномірне (2-фазне) розподілення ємності батарей конденсаторів.

Для визначення фазності до їх підключення використовують спеціальні номограми (рис. 5).

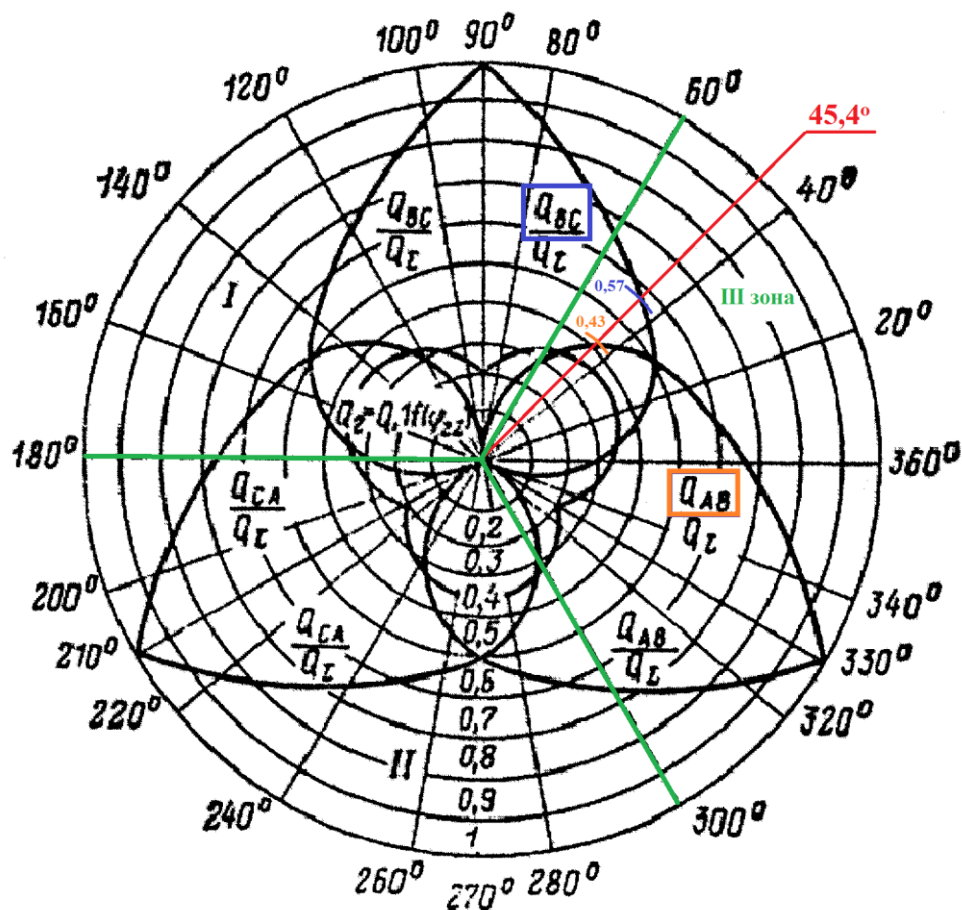


Рис. 5. Номограма розподілу аргументу струму зворотної послідовності та визначення на ній куту ψ , зони та коефіцієнтів номограми

Перед цим треба визначити кут зворотної послідовності несиметричного навантаження (ψ):

$$\psi = \arccos(0,7) = 45,4^{\circ}$$

Згідно монограми кут в III зоні, тобто є додатковий кут ξ .
В діапазоні $330^\circ \leq \psi \leq 90^\circ$ кут $\xi = \frac{\pi}{3} = 60^\circ$

Модуль струму зворотної послідовності несиметричного навантаження:

$$I_2 = I_{2*} \cdot \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_6}$$
$$I_2 = 2,55 \cdot \frac{10 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 140,2 \text{ A}$$

Сумарна потужність батарей конденсаторів дорівнює (для III зони):

$$Q_\Sigma = 2 \cdot \sqrt{3} \cdot K \cdot I_2 \cdot U_{\text{ном}} \cdot \sin(\psi + \xi)$$

де: K – відносна величина зниження несиметрії ($K = 1$, якщо планується повне ліквідування несиметрії), $U_{\text{ном}}$ – номінальна напруга сторони підстанції НН.

$$Q_\Sigma = 2 \cdot \sqrt{3} \cdot 1 \cdot 140,2 \cdot 10,5 \cdot \sin(45,4^\circ + 60^\circ) = 4916,9 \text{ вар} = 4,9 \text{ Мвар}$$

Згідно номограми перетинаються реактивні потужності Q_{AB} та Q_{BC} .

Коефіцієнти номограми: $K_{AB} = 0,43$ та $K_{BC} = 0,57$ (умова $K_{AB} + K_{BC} = 1$ виконується).

Опір батарей конденсаторів відносно АВ:

$$Q_{BK_{AB}} = K_{AB} \cdot Q_\Sigma = 0,43 \cdot 4,9 = 2,114 \text{ Мвар}$$

Опір батарей конденсаторів відносно ВС:

$$Q_{BK_{BC}} = K_{BC} \cdot Q_\Sigma = 0,57 \cdot 4,9 = 2,8 \text{ Мвар}$$

Схема підключення конденсаторних установок зображена в графічній частині. Результати вибору конденсаторних установок зводжу до таблиці 1.

Табл. 1. Характеристики вибраних конденсаторних установок

Фази підк-ня	Найменування	Потужність, квар	Межі регулювання, квар		Габарити, ДхВхШ, мм	Струм, А	Ном. напруга, кВ	Кількість одиниць
			фікс.	рег.				
АВ	УКРМ-10,5-2250-450	2250	3x450	2x450	4294 x 1800 x 770	123,72	10,5	1
ВС	УКРМ-10,5-600-300	600	1x300	1x300	2394 x 1800 x 770	32,99	10,5	1
	УКРМ-10,5-2250-450	2250	3x450	2x450	4294 x 1800 x 770	123,72	10,5	1

4.2 Вибір реактора фільтру

Для виключення режиму перенавантаження для батареї конденсаторів по струму на частотах вищих гармонік завжди підключають через реактор (рис. 6).

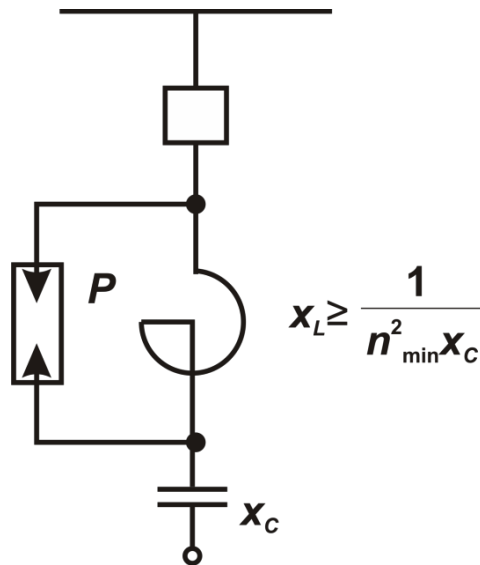


Рис. 6. Схема захисту БК від впливу вищих гармонік

Індуктивність реактора вибирається із умови резонансу напруг при умові, щоб електричне коло «реактор-батарея» носило виключно індуктивний характер на частоті найменшої гармоніки в спектрі.

$$X_C = X_L$$

$$v_{\text{HM}} \cdot \omega \cdot L_p \geq \frac{1}{v_{\text{HM}} \cdot \omega \cdot C_{\text{БК}}}$$

де: v_{HM} – номер гармоніки; $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$.

Необхідно вибрати реактор так, щоб електричне коло носило індуктивний характер. Визначаємо ємність БК:

$$C_{\text{БК}} = \frac{Q_{\text{БК}} \cdot 10^9}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot U_{\text{НОМ}}^2}$$

де: $Q_{\text{БК}}$ – потужність БК на 1-ій СШ, квар.

$$C_{\text{БК}} = \frac{11000 \cdot 10^9}{2 \cdot 3.14 \cdot 50 \cdot 10500^2} = 317,59 \text{ мкФ}$$

З умови рівняння резонансу можна визначити опір реактору:

$$L_p = \frac{1}{\nu_{\text{НМ}}^2 \cdot (2 \cdot \pi \cdot f)^2 \cdot C_{\text{БК}}}$$

$$L_p = \frac{1}{5^2 \cdot (2 \cdot 3,14 \cdot 50)^2 \cdot 317,59} = 1,28 \text{ мГн}$$

Приймаємо до установки фільтровий реактор типу ФРТС 10-167-1,5

Параметри обраного реактору:

- номінальна індуктивність реактору $L_{p.\text{табл}} = 1,5 \text{ мГн}$;
- струм першої гармоніки $I_{1.\text{табл}} = 125 \text{ А}$, що більше $I_1 = 110 \text{ А}$

4.3. Розрахунок фільтро-компенсуючих пристроїв

Для розрахунку мінімально допустимої потужності ФКУ необхідно знайти струми гармонік перетворювача.

Розраховуємо струм для 5ї гармоніки :

$$I_5 = \frac{S_{np}}{n \cdot \sqrt{3} U_H} = \frac{12000}{5 \cdot 1,73 \cdot 10,5} = 132,2 \text{ А}$$

Для 7,11,13 розрахунок аналогічний, результат:

$$I_7 = 94,37 \text{ А}, I_{11} = 60,05 \text{ А}, I_{13} = 50,81 \text{ А}$$

Визначаємо дефіцит реактивної потужності на шинах 20 кВ:

$$Q_{\text{пр}} = S_{\text{пр}} \cdot \sin \varphi$$

$$Q_{\text{пр}} = 12000 \cdot 0.6 = 7200 \text{ кВАР}$$

$$Q_{\text{ад}} = S_{\text{ад}} \cdot \sin \varphi$$

$$Q_{\text{ад}} = 5 \cdot 1000 \cdot 0.52 = 2600 \text{ кВАР}$$

$$Q_{\Sigma} = 7200 + 2600 = 9800 \text{кВАР}$$

Визначаємо кратність струму 7-ї гармоніки, яка проходить через ФКУ 5-ї гармоніки :

$$I_{екв} = \sqrt{I_5^2 + (g_7 \cdot I_7)^2}$$

$$g_7 = \frac{1}{\frac{1}{\Delta_p \cdot n^2} \left[1 - \left(\frac{5}{n} \right)^2 \right] + 1}$$

$$K_{mp} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{154}{10,5} = 14,7$$

$$\Delta_p = \frac{Q_{\Sigma}}{\frac{S_k}{K_{mp}}} = \frac{9800}{\frac{1600000}{14,7}} = 0,1$$

$$g_7 = \frac{1}{\frac{1}{0,1 \cdot 5^2} \left[1 - \left(\frac{5}{7} \right)^2 \right] + 1} = 0,888$$

$$g_{11} = 0,827; g_{13} = 0,809.$$

$$I_{екв} = \sqrt{132,2^2 + (0,888 \cdot 94,37)^2} = 156,52 \text{А}$$

$$\text{Кратність перенавантаження БК за струмом} \frac{156,52}{132,2} = 1,183$$

Визначаємо реактивну потужність батарей конденсаторів за еквівалентним струмом :

$$Q_{БК} = \sqrt{2} \cdot I_{екв} \cdot U_n = 1,41 \cdot 1,183 \cdot 156,52 \cdot 10500 = 274134 \text{кВАР}$$

При порівнянні зі значеннями реактивної потужності установка фільтра допустима.

Визначаємо остаточне значення вищих гармонік після установки ФКУ5:

$$U_5^* = 0\%$$

$$U_7^* = \sqrt{7}(1 - g_7) = 0,312\%$$

$$U_{11}^* = 0,568\%; U_{13}^* = 0,691\%$$

Значення коефіцієнта викривлення після установки ФКУ:

$$K_u^* = \sqrt{(U_5^*)^2 + (U_7^*)^2}$$

$$K_u^* = \sqrt{(0)^2 + (0.312)^2} = 0.312 = 3,1\%$$

Після установки ФКУ коефіцієнт викривлення знаходиться в нормально допустимих значеннях згідно українським та європейським ГОСТ 13109- 97, інформацію взято із [Л2].

5. РОЗРАХУНОК ДОДАТКОВИХ ВТРАТ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Глибина комутаційного викривлення:

$$\Delta U_1 = \frac{X_{*C}}{(X_{*C} + X_{*T.пр})} \cdot \sqrt{2} \cdot U_{ном} \cdot \sin \phi_{пр}$$

$$\Delta U_1 = \frac{0,0655}{(0,0655 + 0,0875)} \cdot \sqrt{2} \cdot 10,5 \cdot \sin (\arccos(0,8)) = 3,81 \text{ (кВ)}$$

Кут комутації випрямляча:

$$\gamma = \frac{6 \cdot (X_{*C} + X_{*T.пр})}{m \cdot \sin \phi_{пр}}$$

де: m – фазність перетворювача

$$\gamma = \frac{6 \cdot (0,0655 + 0,0875)}{6 \cdot \sin (\arccos(0,8))} = 0,255$$

λ (в інженерному методі) – коефіцієнти вищих гармонік, які визначаються за розрахунковими номограмами (рис. 7), з урахуванням γ .

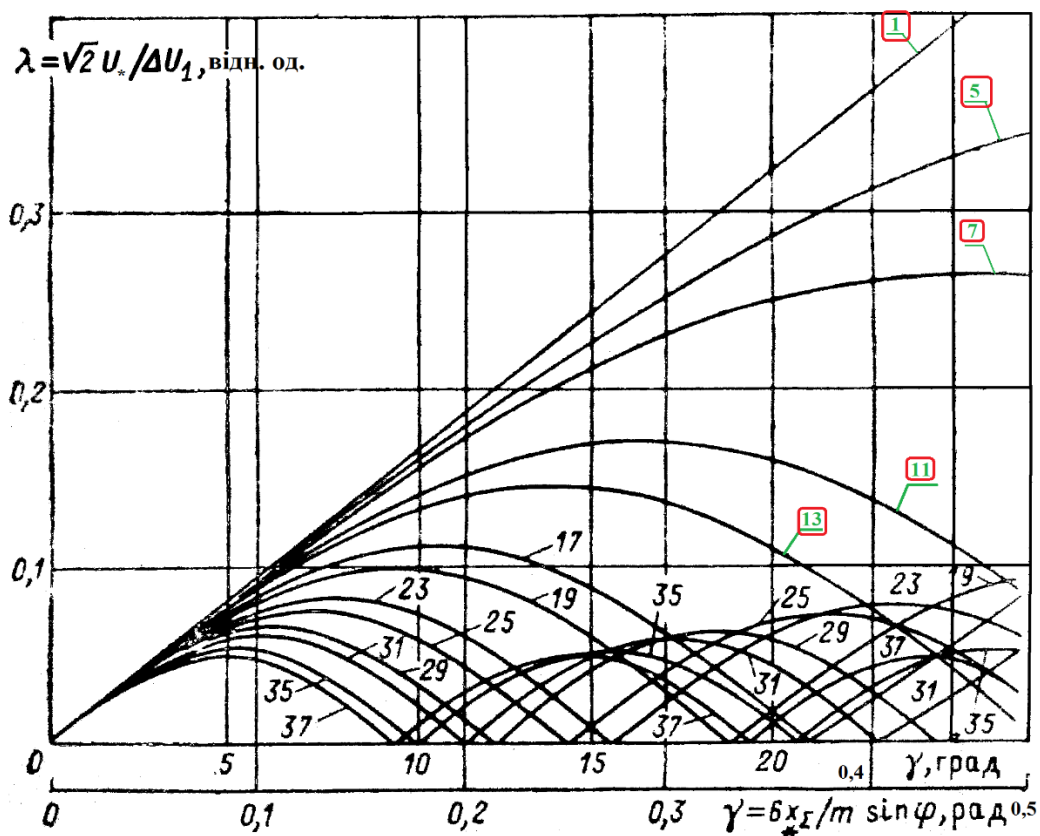


Рис. 7. Номограми для визначення окремих гармонік напруги при роботі вентильних перетворювачів

Для $\gamma = 0,663$: $\lambda_5 = 0,23$, $\lambda_7 = 0,21$, $\lambda_{11} = 0,17$, $\lambda_{13} = 0,14$

Визначаємо напруги для кожної v -ої гармоніки в іменованих та відносних одиницях:

$$U_v = \lambda_v \cdot \Delta U_1 / \sqrt{2}$$

$$U_{v*} = U_v / U_{\text{НОМ}} \cdot 100\%$$

Для 5-ої гармоніки:

$$U_5 = \lambda_5 \cdot \Delta U_1 / \sqrt{2}$$

$$U_5 = 0,23 \cdot 3,81 / \sqrt{2} = 0,593 \text{ кВ}$$

$$U_{5*} = U_5 / U_{\text{НОМ}} \cdot 100\%$$

$$U_{5*} = 0,593 / 10,5 \cdot 100\% = 5,64\% = 0,0564$$

Для 7-ої гармоніки:

$$U_7 = \lambda_7 \cdot \Delta U_1 / \sqrt{2}$$

$$U_7 = 0,21 \cdot 3,81 / \sqrt{2} = 0,56 \text{ кВ}$$

$$U_{7*} = U_7 / U_{\text{НОМ}} \cdot 100\%$$

$$U_{7*} = 0,56 / 10,5 \cdot 100\% = 5,39\% = 0,0539$$

Для 11-ої гармоніки:

$$U_{11} = \lambda_{11} \cdot \Delta U_1 / \sqrt{2}$$

$$U_{11} = 0,17 \cdot 3,81 / \sqrt{2} = 0,458 \text{ кВ}$$

$$U_{11*} = U_{11} / U_{\text{НОМ}} \cdot 100\%$$

$$U_{11*} = 0,458 / 10,5 \cdot 100\% = 4,36\% = 0,0436$$

Для 13-ої гармоніки:

$$U_{13} = \lambda_{13} \cdot \Delta U_1 / \sqrt{2}$$

$$U_{13} = 0,14 \cdot 3,81 / \sqrt{2} = 0,38 \text{ кВ}$$

$$U_{13*} = U_{13} / U_{\text{НОМ}} \cdot 100\%$$

$$U_{13*} = 0,38 / 10,5 \cdot 100\% = 3,59\% = 0,0359$$

1. Визначаємо дефіцит реактивної потужності на шинах 10,5 кВ:

- 6-фазного перетворювача:

$$Q_{\text{пр}} = S_{\text{пр}} \cdot \sin \varphi_{\text{пр}}$$

$$Q_{\text{пр}} = 12 \cdot \sin(\arccos(0,8)) = 7,2 \text{ Мвар}$$

- асинхронних двигунів:

$$Q_{\text{АД}} = S_{\text{АД}} \cdot n_{\text{АД}} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{\text{АД}} = \frac{S_{\text{АД}} \cdot n_{\text{АД}} \cdot \sin \varphi_{\text{АД}}}{\cos \varphi_{\text{АД}}}$$

$$Q_{\text{АД}} = \frac{1 \cdot 5 \cdot 0,52}{0,85} = 3,06 \text{ Мвар}$$

$$Q_{\text{о}\Sigma} = Q_{\text{пр}} + Q_{\text{АД}}$$

$$Q_{\text{о}\Sigma} = 7,2 + 3,06 = 10,26 \text{ Мвар}$$

$$\Delta p = \frac{Q_{\text{о}}}{S_{\text{КЗ}}}$$

$$\Delta p = \frac{10,26}{1600} = 0,0064 \text{ МВт} = 6,4 \text{ кВт}$$

Визначаємо коефіцієнт гармонійних втрат:

$$A_n = 1/(v \cdot \sqrt{v})$$

де: v - номер гармоніки.

Визначимо відразу для всіх гармонік: 5-ої, 7-ої, 11-ої та 13-ої.

$$A_5 = \frac{1}{5 \cdot \sqrt{5}} = 0,0894$$

$$A_7 = \frac{1}{7 \cdot \sqrt{7}} = 0,054$$

$$A_{11} = \frac{1}{11 \cdot \sqrt{11}} = 0,027$$

$$A_{13} = \frac{1}{13 \cdot \sqrt{13}} = 0,021$$

2. Визначимо додаткові втрати в цехових трансформаторах типу ТМ-1600/10/0,4 з характеристиками: $\Delta P_{кз} = 18$ кВт; $K_3 = 0,7$; $U_{кз\%} = 5,5\%$.

Номінальні втрати в цеховому трансформаторі:

$$\Delta P_{ном.тр} = \Delta P_{кз} \cdot K_3^2$$

$$\Delta P_{ном.тр} = 18 \cdot 0,7^2 = 8,82 \text{ кВт}$$

Знаходимо індекс втрат для цехового трансформатора:

- несиметрії:

$$\rho_{тр}^{нс} = 1/(u_{кз}/100)^2$$

$$\rho_{тр}^{нс} = 1/(5,5/100)^2 = 330,5$$

- несинусоїдальності:

$$\rho_{тр}^{вг} = 0,6/(u_{кз}/100)^2$$

$$\rho_{тр}^{вг} = 0,6/(5,5/100)^2 = 198,34$$

Визначаємо додаткові втрати в цеховому трансформаторі від несиметрії:

$$\Delta P_{нс.тр} = \Delta P_{ном.тр} \cdot \rho_{ном.тр}^{нс} \cdot K_{2U(K1)}^2 \cdot n_{тр}$$

$$\Delta P_{нс.тр} = 8,82 \cdot 330,5 \cdot 0,0616^2 \cdot 6 = 66,367 \text{ кВт}$$

Визначаємо додаткові втрати в цеховому трансформаторі від несинусоїдальності:

$$\Delta P_{\text{вг.тр}} = \Delta P_{\text{номтр}} \cdot \rho_{\text{тр}}^{\text{вг}} \cdot \sum_{V=2}^n \Lambda_n \cdot U^2_v$$

$$\Delta P_{\text{вг.тр}} = 8,82 \cdot 198,34 \cdot (0,0894 \cdot 0,593^2 + 0,054 \cdot 0,56^2 + 0,027 \cdot 0,458^2 + 0,021 \cdot 0,38^2) = 99,83 \text{ кВт}$$

3. Розрахуємо втрати активної потужності від несиметрії і несинусоїдальності в асинхронних двигунах типу Siemens 1LA8457-4PC з характеристиками: $P_{\text{ном}} = 1 \text{ МВт}$; $f = 3000 \text{ об/хв}$; $\eta_{\text{ном}} = 97 \%$; $K_{\text{п}} = 5,9$.

Знайдемо індекс втрат для асинхронного двигуна:

- несиметрії:

$$\rho_{\text{ад}}^{\text{нс}} = 2,41 \cdot K_n$$

$$\rho_{\text{ад}}^{\text{нс}} = 2,41 \cdot 5,9 = 14,219$$

- несинусоїдальності:

$$\rho_{\text{ад}}^{\text{вг}} = K_n^2$$

$$\rho_{\text{ад}}^{\text{вг}} = 5,9^2 = 34,81$$

Номінальні втрати в асинхронному двигуні:

$$\Delta P_{\text{номАД}} = P_{\text{ном}} \cdot \frac{1 - \eta_{\text{ном}}}{\eta_{\text{ном}}}$$

$$\Delta P_{\text{номАД}} = 1 \cdot \frac{1 - 0,97}{0,97} = 0,0309 \text{ МВт} = 30,9 \text{ кВт}$$

Визначаємо додаткові втрати в асинхронних двигунах від несиметрії:

$$\Delta P_{\text{нс.ад}} = \Delta P_{\text{ном}} \cdot \rho_{\text{ном.ад}}^{\text{нс}} \cdot K_{2U(K1)}^2 \cdot n_d$$

$$\Delta P_{\text{нс.ад}} = 30,9 \cdot 14,219 \cdot 0,0616^2 \cdot 5 = 8,336 \text{ кВт}$$

Визначаємо додаткові втрати в асинхронних двигунах від несинусоїдальності:

$$\Delta P_{\text{вг.ад}} = \Delta P_{\text{номАД}} \cdot \rho_{\text{ад}}^{\text{вг}} \cdot \sum_{V=2}^n \Lambda_n \cdot U^2_v$$

$$\Delta P_{\text{вг.ад}} = 30,9 \cdot 34,81 \cdot (0,0894 \cdot 0,593^2 + 0,054 \cdot 0,56^2 + 0,027 \cdot 0,458^2 + 0,021 \cdot 0,38^2) = 61,384 \text{ кВт}$$

4. Визначимо додаткові втрати в трансформаторах ГПП типу ТРДН-32000/150 з характеристиками: $\Delta P_{K3} = 145$ кВт, $K_3 = 0,7$, $U_{K3\%} = 10,5$. Знайдемо індекс втрат для трансформаторів на стороні ВВ за формулою:

$$\begin{aligned}\rho_{\text{тр}}^{\text{HC}} &= 1/(u_{K3}/100)^2 \\ \rho_{\text{тр}}^{\text{HC}} &= 1/(10,5/100)^2 = 90,7 \\ \rho_{\text{тр}}^{\text{BF}} &= 0,6/(u_{K3}/100)^2 \\ \rho_{\text{тр}}^{\text{BF}} &= 0,6/(10,5/100)^2 = 54,42\end{aligned}$$

Номінальні втрати в трансформаторі ГПП:

$$\begin{aligned}\Delta P_{\text{ном.тр}} &= \Delta P_{K3} \cdot K_3^2 \\ \Delta P_{\text{ном.тр}} &= 145 \cdot 0,7^2 = 71,05 \text{ кВт}\end{aligned}$$

Визначаємо додаткові втрати в трансформаторах ГПП від несиметрії:

$$\begin{aligned}\Delta P_{\text{нс.тр}} &= \Delta P_{\text{ном.тр}} \cdot \rho_{\text{ном.тр}}^{\text{HC}} \cdot K_{2U(K1)}^2 \cdot n_{\text{тр}} \\ \Delta P_{\text{нс.тр}} &= 71,05 \cdot 90,7 \cdot 0,0616^2 \cdot 2 = 48,9 \text{ кВт}\end{aligned}$$

Визначаємо додаткові втрати в трансформаторах ГПП від несинусоїдальності:

$$\Delta P_{\text{вг.тр}} = \Delta P_{\text{ном.тр}} \cdot \rho_{\text{тр}}^{\text{BF}} \cdot \sum_{V=2}^n \Lambda_n \cdot U^2_v$$

$$\begin{aligned}\Delta P_{\text{вг.тр}} &= 71,05 \cdot 54,42 \cdot (0,0894 \cdot 0,593^2 + 0,054 \cdot 0,56^2 + 0,027 \cdot 0,458^2 + \\ &0,021 \cdot 0,38^2) = 220,665 \text{ кВт}\end{aligned}$$

Визначаємо струми для кожної ν -ої гармоніки:

$$\begin{aligned}I_\nu &= \frac{S_{\text{ПР}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{H}} \cdot n_n} \\ I_5 &= \frac{12000}{\sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 5} = 132 \text{ А} \\ I_7 &= \frac{12000}{\sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 7} = 94,26 \text{ А} \\ I_{11} &= \frac{12000}{\sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 11} = 60 \text{ А}\end{aligned}$$

$$I_{13} = \frac{12000}{\sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 13} = 50,76 \text{ А}$$

Визначаємо додаткові втрати 6-фазного перетворювача для ν -ої гармоніки:

$$\Delta P_{\text{пр}\nu} = I_{\nu} \cdot U_{\text{н}}$$

$$\Delta P_{\text{пр}5} = 132 \cdot 10,5 = 1386 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_{\text{пр}7} = 94,26 \cdot 10,5 = 989,73 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_{\text{пр}11} = 60 \cdot 10,5 = 630 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_{\text{пр}12} = 50,76 \cdot 10,5 = 533 \text{ кВт}$$

6. РОЗРАХУНОК РІЧНИХ ЗБИТКІВ В ЕНЕРГОСИСТЕМІ УКРАЇНИ ВІД НЕЯКІСНОЇ НАПРУГИ НАБЛИЖЕНИМ МЕТОДОМ ЕКСПЕРТНИХ ОЦІНОК

Коефіцієнт гармонійних втрат:

$$A_{\nu} = \sum_{\nu=5}^{13} \left(\frac{U_{\nu*}^2}{\nu \cdot \sqrt{\nu}} \right)$$

де: $U_{\nu*}$ – напруга ν -ої гармоніки у відносних одиницях; ν – номер гармоніки.

$$A_{\nu} = \frac{0,0564^2}{5 \cdot \sqrt{5}} + \frac{0,0539^2}{7 \cdot \sqrt{7}} + \frac{0,0436^2}{11 \cdot \sqrt{11}} + \frac{0,0359^2}{13 \cdot \sqrt{13}} = 0,003243$$

Коефіцієнт перерозрахунку вартості гармонійних коливань електроенергії:

$$K_{\beta} = \beta / 0,01$$

$$\beta = 1,5 \text{ грн/кВт} \cdot \text{год}$$

$$K_{\beta} = 1,5 / 0,01 = 150 \text{ грн/кВт} \cdot \text{год}$$

Щорічні збитки від несинусоїдальності напруги в елементах СЕП:

- трансформатору ГПП ТРДН-32000/150:

$$Y_1 = (K_{\beta} \cdot 510 \cdot T \cdot \Delta P_{\text{кз}} + 7,3 \cdot K) \cdot A_{\nu}$$

де: T – час роботи трансформатору ГПП за рік, годин; $\Delta P_{\text{кз}}$ – втрати короткого замикання, кВт; K – вартість трансформатору, грн.

$$Y_1 = (150 \cdot 510 \cdot 8600 \cdot 145 + 7,3 \cdot 10000000) \cdot 0,003243$$

$$= 95\,395\,523\,674 \text{ грн}$$

- цехового трансформатору ТМ-1600/10/0,4:

$$Y_2 = (K_\beta \cdot 610 \cdot T \cdot \Delta P_{\text{КЗ}} + 1,2 \cdot K) \cdot \Lambda_v$$

де: T – час роботи цехового трансформатору за рік, годин; $\Delta P_{\text{КЗ}}$ – втрати короткого замикання, кВт; K – вартість трансформатору, грн.

$$Y_2 = (150 \cdot 610 \cdot 8000 \cdot 18 + 1,2 \cdot 1000000) \cdot 0,003243$$

$$= 42\,733\,659,6 \text{ грн}$$

- асинхронного двигуна Siemens 1LA8457-4PC:

$$Y_3 = (K_\beta \cdot 250 \cdot T \cdot \Delta P_{\text{МН}} + 4 \cdot K) \cdot \Lambda_v$$

де: T – час роботи асинхронного двигуна за рік, годин; $\Delta P_{\text{МН}}$ – втрати, кВт; K – вартість асинхронного двигуна, грн.

$$Y_3 = (150 \cdot 250 \cdot 6500 \cdot 30 + 4 \cdot 500000) \cdot 0,003243 = 23\,720\,923,5 \text{ грн}$$

- кабельної лінії СБН 3x120:

$$Y_4 = 0,1 \cdot L_{\text{КЛ}} \cdot K_0 \cdot \sum_{v=5}^{13} (v \cdot U_{v*}^2)$$

де: $L_{\text{КЛ}}$ – довжина КЛ, м; K_0 – питома вартість КЛ, грн/м.

$$Y_4 = 0,1 \cdot 4500 \cdot 1300 \cdot (5 \cdot 0,0564^2 + 7 \cdot 0,0539^2 + 11 \cdot 0,0436^2 + 13 \cdot 0,0359^2) = 43\,235,22 \text{ грн}$$

Загальні щорічні збитки від несинусоїдальності напруги:

$$Y_\Sigma = Y_1 \cdot N_1 + Y_2 \cdot N_2 + Y_3 \cdot N_3 + Y_4$$

де: N_i – кількість певного силового обладнання.

$$Y_\Sigma = 95\,395\,523\,674 \cdot 2 + 42\,733\,659,6 \cdot 6 + 23\,720\,923,5 \cdot 5 + 43\,235,22$$

$$= 191\,166\,097\,158,32 \text{ грн}$$

7. Обґрунтування установки в мережах 0,4 та 6 кВ фільтрів гармонік компанії «NOKIAN CAPACITORS»

Компенсація реактивної потужності

Постачальники електроенергії виставляють рахунок за всю поставлену потужність - не тільки за активну потужність, необхідну для роботи електродвигунів, але також і за реактивну потужність, необхідну, наприклад, для підтримки магнітних полів двигунів. Тільки лише частина реактивної потужності включається у вартість електроенергії. Якщо реактивна потужність виробляється силовою електростанцією, розподільні системи та обладнання мають бути розраховані на це.

Потужність повинна бути набагато вище, ніж потрібно насправді. Тому розумно виробляти реактивну потужність там, де це необхідно. Переваги полягають у наступному:

- Правильний розрахунок розмірів розподільчих систем і устаткування приносить економію в самому джерелі.
- Немає необхідності посилення передавальних або розподільних систем
- Дешевші тарифи на електроенергію, немає необхідності оплачувати реактивну потужність.

Фільтрація гармонік

У зв'язку з компенсацією реактивної потужності необхідно також брати до уваги якість електроенергії. Фільтрація гармонік знижує ризик технічних відмов і порушень в енергосистемах. Перешкоди в напрузі, що є результатом, внесеним струмами гармонійних складових, викликаються перетворювачами, приводами постійної напруги, флуоресцентними світильниками, перетворювачами частоти, джерелами безперебійного живлення, дуговими печами та ін. На практиці гармонійні струми є скрізь. Фільтрація гармонік приносить велику кількість переваг:

- Зводяться до мінімуму спотворення в телекомунікації та передачі даних.

- Безперебійно працюють електронні пристрої, системи контролю, перетворювачі, електромотори та генератори.

- Відсутність резонансу, відсутність похибок при вимірюванні, зниження втрат при передачі електроенергії.

- Відсутність ризику перевантаження кабелів, випадкового відключення реле або запобіжників. Погана якість електроенергії може довгий час залишатися непоміченим. Дефіцит якості може легко внести додаткові витрати у вигляді високих рахунків на оплату електроенергії та надмірно вирости розмірів силових систем.

Фільтри гармонік для мереж низької напруги

Магістральні та розподільні мережі призначені для роботи з синусоїдальною напругою і струмом на певній частоті. Однак, коли до системи підключаються нелінійні навантаження такі, як тиристорні приводи, перетворювачі і дугові печі, починають вироблятися надлишкові гармоніки струмів, що призводить до спотворень струму і напруги.

Фільтрація гармонік є найкращим способом зведення до мінімуму спотворень в енергосистемі, але при цьому одночасно виробляється реактивна потужність

Корекція коефіцієнта потужності і фільтрація гармонік

До складу фільтрів гармонік входять конденсатори, послідовно з'єднані з дроселем. Конденсатори виробляють реактивну потужність на базовій частоті фільтра, а ланцюг розраховується таким чином, щоб забезпечити необхідну корекцію коефіцієнта потужності. Індуктивність дроселя вибирається таким чином, щоб фільтр створював на частоті гармоніки послідовну резонансну ланцюг з дуже низьким повним опором. Цим забезпечується проходження більшої частини гармонік через фільтр.

До складу типового фільтра гармонік входять три послідовні резонансні ланцюга, налаштовані на найзагальніші гармоніки (5-ю, 7-ю і 11 -ю). Фільтри полягають в сталеві корпусу. У кожному з них передбачений контактор, термореле максимального струму, дросель і конденсатори. Всі пристрій зазвичай підключається до живильних кабелях, захищеним плавкими запобіжниками, головного розподільного щита.

Фільтри гармонік можуть працювати за тим же принципом, що і комутовані конденсаторні установки: вони управляються за допомогою регулятора реактивної потужності відповідно до вимог по реактивної потужності.

Фільтри гармонік проектується відповідно до індивідуальних вимог замовника для кожного конкретного випадку застосування, на базі стандартних компонентів. Це дозволяє забезпечити найкращу корекцію коефіцієнта потужності і найкращі характеристики фільтрації при прийнятних витратах.

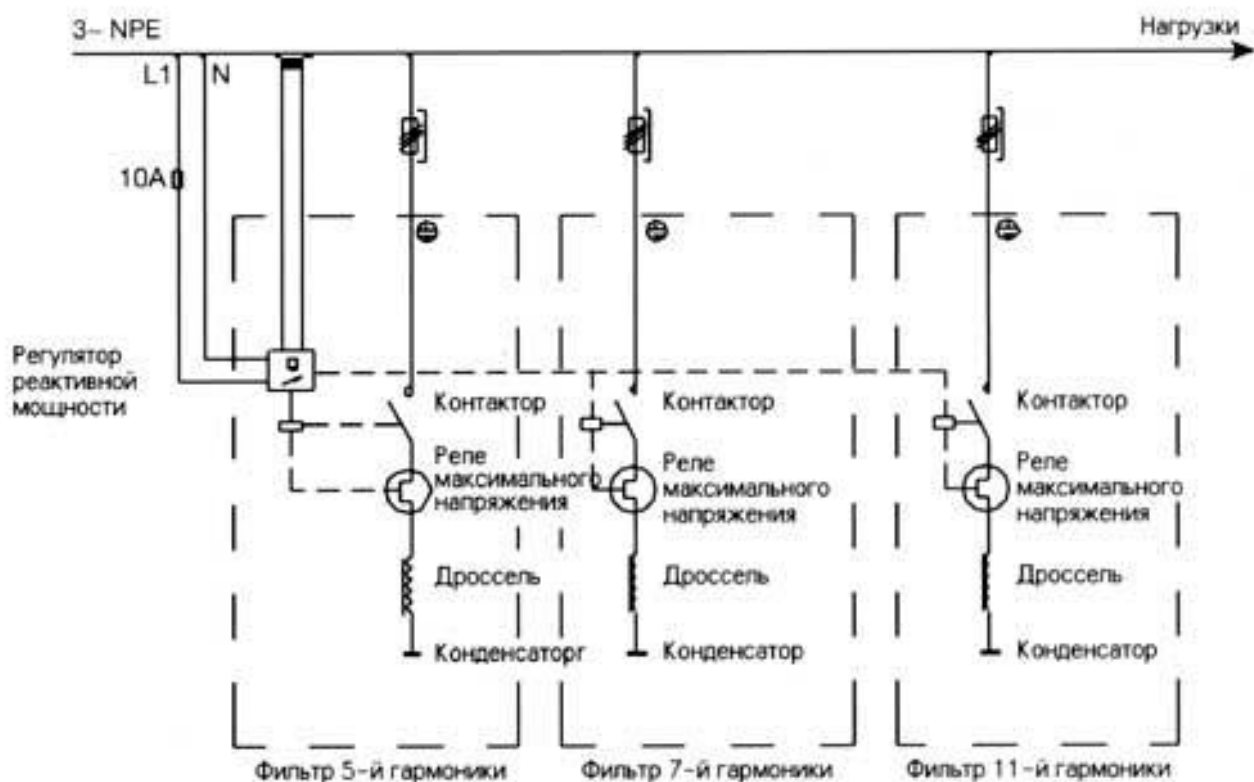


Рис. 8. Схема ФКУ 5, 7 та 11 гармоніки

1. Регулятор реактивної потужності
2. Контактор
3. Термореле
4. Дроссель
5. Конденсаторний блок



Рис. 9. Регулятор реактивної потужності

Низьковольтне устаткування

Низьковольтні силові конденсатори - це сухі конденсатори, з металізованою плівкою і повітряним охолодженням. Є широкий діапазон одно- і трифазних пристроїв для різного застосування. Конденсаторні групи низької напруги можуть бути фіксованою потужності або з автоматичною підстроюванням, і мають всі необхідні комутаційні пристрої вбудованого типу.

Високовольтне обладнання

Високовольтні силові конденсатори представлені широким діапазоном одно- і трифазних пристроїв з повністю плівковим діелектриком і захистом з харчування та від перенапруг.

Виконані за найсучаснішою технологією вони задовольняють вимогам для використання в різних кліматичних і експлуатаційних умовах. Вони можуть бути відкритого типу або герметичні, високо або низьковольтними, фіксованого потужності, вбудованими або для використання з індивідуальними електродвигунами. Фільтри гармонік являють собою економічний метод компенсації та зниження струмів гармонік, що викликаються нелінійними навантаженнями. Фільтри гармонік індивідуально проектується для задоволення специфічних вимог замовника.



Рис. 10. Зовнішній вигляд конденсаторів високої напруги

Реактори

Сухі ізольовані реактори з повітряним сердечником і з повітряним охолодженням випускаються для різних областей застосування. Повний діапазон включає струмообмежуючі реактори, демпфируючі реактори, реактори фільтра, реактори паралельного включення і статистичні компенсатори реактивної потужності. Сучасна технологія виробництва

забезпечує відмінні механічні та електричні властивості продукції навіть при роботі в екстремальних погодних умовах.



Рис. 11. Зовнішній вигляд реакторів

Послідовні конденсатори

Послідовні конденсатори застосовуються для найбільш ефективного використання ліній електропередач. Різноманітність вироблення, передачі та розподілу на додаток до великим відстаням передачі електроенергії і потужним електростанціям призводять до підвищення вимог щодо економічності та надійності роботи систем передачі енергії. Вимоги щодо збільшення передачі активної потужності означають подальше збільшення протяжності ліній електропередач, яку компенсацію реактивності ЛЕП. Поздовжня компенсація є економічним методом удосконалення продуктивності передачі електроенергії ліній. Послідовні конденсатори збільшують пропускну спроможність ЛЕП, підвищують стабільність роботи системи, знижують втрати в системі, покращують профіль напруги ліній і оптимізують поділ струму між

паралельними лініями. Вартість конденсаторної групи становить зазвичай всього лише 10-15 від вартості нової ЛЕП. Час окупності інвестицій, вкладених в конденсаторні групи, становить зазвичай лише кілька років.

Статичні компенсатори збурень

Збурення при звичайній роботі ліній передачі електроенергії і промислових розподільних систем можуть бути викликані підключенням ліній, аваріями на лініях, нелінійними компонентами такими, як тиристорні регулятори і швидко змінюються активні або реактивні навантаження. Виникаючі проблеми, викликані наявністю гармонік, і вимагають додаткової реактивної потужності, що викликають флуктуації напруги, флікер-ефект, незбалансовані навантаження і швидкі зміни реактивної потужності, можуть бути вирішені за допомогою швидкодіючого статичного компенсатора. Це пристрій проектується індивідуально для вирішення конкретних проблем кожного замовника, і ґрунтується на стандартних компонентах.

Електронне обладнання

Широкий діапазон високотехнологічного електронного обладнання, що включає регулятори реактивної на мікропроцесорах, незбалансовані реле захисту для конденсаторних груп і фарадометри для тестування всередині ланцюга індивідуальних пристроїв в конденсаторних групах, необхідні для завершення ряду продукції, що служить для компенсації реактивної потужності та фільтрації гармонік.

Практична користь від використання ФКУ

Установка в живлячій мережі 6 кВ і введення в експлуатацію регульованих фільтрокомпенсуючих пристроїв з установкою динамічної компенсації реактивної потужності виробництва фінської фірми «NOKIAN CAPACITORS» практично обґрунтовує важливі показники.

1. Протікання раціональних режимів електроспоживання:

- нульове перетікання реактивної потужності на межі балансової приналежності живлячої електромережі;
- скорочення втрат активної електроенергії по перетіканнях реактивної;
- підвищення величини активної потужності, що вводиться в печі;
- зниження навантаження мережевих трансформаторів і живлячих кабельних ліній.

2. Оптимізацію ведення технологічного процесу плавки в печах:

- скорочення циклу плавки;
- зниження величини питомих витрат активної електроенергії;
- скорочення витрати електродів;
- стабілізацію протікання ізотермічних процесів в печах;
- підвищення продуктивності пічних агрегатів.

3. Електромагнітну сумісність сталеплавильних печей з живлячою електричною мережею:

- нейтралізацію вищих гармонік струму, що генеруються електропічними агрегатами;
- стабілізацію напруги мережі;
- симетрування напруги мережі;
- збільшення терміну служби ізоляції елементів електричної мережі (кабелів, трансформаторів і ін.) і її електроприймачів (конденсаторних установок і ін.);
- підвищення надійності роботи релейного захисту.

Оптимальна компенсація реактивної потужності і підтримка потрібних по ГОСТ 13109-97 показників якості електроенергії з використанням установки УДК і ФКП, підтримка оптимального коефіцієнта потужності і пригнічення вищих гармонік струму і напруги є одним з ефективних енергозберіжних заходів.

8. Заходи з автоматичного регулювання рівнів напруги

Автоматичне регулювання напруги за допомогою конденсаторних установок. Одним з основних способів підвищення якості напруги у споживачів електричних мереж може бути впровадження системи автоматичної компенсації реактивної потужності. Умовою розміщення компенсуючих пристроїв є впливу на режим напруги і зниження втрат активної потужності в мережах від реактивних навантажень. Тому установка щодо більшої потужності конденсаторів доцільна в місцях найбільших реактивних навантажень і опорів живильних ліній.

При цьому необхідно домагатися найкращого використання конденсаторів і найменшої вартості встановленого для цього обладнання.

У практиці експлуатації розрізняють централізовану, групову та індивідуальну компенсацію реактивної потужності.

При централізованій компенсації конденсатори встановлюють в будівлі ДПП. У цьому випадку від реактивної потужності розвантажуються електростанції і ЛЕП, що живлять споживачів.

При груповій компенсації конденсатори розташовують на окремих великих приєднання і розвантажують від реактивної потужності кола.

При індивідуальній компенсації конденсатори підключають до затискачів електроприймача. У цьому випадку всі мережі електропостачання розвантажуються від реактивної потужності.

Виходячи з вищевказаних міркувань, найбільш раціональне для умов підприємства розміщення конденсаторних установок - безпосередньо в розподільчих пунктах 10 кВ і ЦРП, тобто групова компенсація, при якій розвантажуються живлять кабельні ЛЕП 6 кВ. Для цих цілей використовуються конденсаторні установки, призначені для компенсації реактивної потужності в електричних мережах напругою 6 кВ. Вони забезпечені максимальним захистом, захистом від перевантажень і мінімальної напруги.

Регулювання напруги в освітлювальних мережах

Відхилення напруги в освітлювальних мережах призводить до ряду негативних наслідків: зміна освітленості робочих місць, вплив на зорову здатність обслуговуючого персоналу, зниження терміну служби освітлювальних приладів (ламп), перевитрата електроенергії і світильників, і, в кінцевому рахунку, зниження продуктивності праці.

Для забезпечення належного рівня напруги освітлювальних установок можливе створення різних режимів освітлення при дистанційному, автоматичному і ручному управлінні. Так, наприклад, протягом нічного часу доби та у вихідні дні, коли електроспоживання промислових підприємств різко знижується, підвищення напруги в освітлювальних мережах викликає масове перегорання ламп і перевитрату електроенергії. Цього можна уникнути застосуванням регуляторів з можливістю завдання заздалегідь розроблених режимів. Регулювання напруги в освітлювальних мережах промислових підприємств може здійснюватися шляхом обмеження напруги зверху в межах певного значення, стабілізації в заданих межах певного рівня і шляхом регулювання за різними програмами, визначальним оптимальну освітленість в заданий час.

Як зазначалося вище, для даного підприємства характерно спільне харчування силової та освітлювальної навантажень. При цьому можна рекомендувати виконувати установку перемикачів силових трансформаторів напругою 6/0,4 кВ з ПБЗ таким чином, щоб при максимальному навантаженні трансформатора напруга на останній лампі мережі освітлення було не менше $0,975U_{\text{ном}}$. У цьому випадку застосування обмежувачів напруги дозволить повністю вирішити проблему регулювання напруги в освітлювальній мережі.

В якості технічного засобу регулювання напруги представляється можливим застосування сучасних тиристорних обмежувачів напруги типу ТОН-3. Це пов'язано з їх універсальністю, оскільки вони призначені для установки в освітлювальних мережах як з лампами розжарювання, так і з газорозрядними джерелами світла.

Обмежувач напруги типу ТОН-3-220-63 розміщується в шафі розміром 465x935x395 мм захищеного виконання, підлогового або настінного кріплення.

Основу силової частини схеми обмежувача складають три блоки вентилів, кожен з яких виконаний по зустрічно-паралельною схемою і включений у відповідну фазу навантаження. Для захисту тиристорів від виходу з ладу при короткому замиканні на стороні навантаження в блоках вентилів встановлені швидкодіючі запобіжники типу ПНБ5М-380/400. Для захисту тиристорів від комутаційних перенапруг на підставах блоків вентилів встановлені RC-ланцюжка.

Доцільність застосування регуляторів напруги в основному визначається значенням еквівалентного напруги у ламп $U_{екв}$, а також наступними характеристиками освітлювальної установки: річним числом використання освітлення; типів джерел світла; середньою потужністю джерел світла; вартістю заміни ламп, яка визначається способом доступу до останніх.

Під $U_{екв}$ розуміють таке незмінне в часі напруга, при якому термін служби лампи відповідав би очікуваному в даній установці. Воно визначається на підставі тривалого вимірювання напруги в характерних точках груповий освітлювальної мережі.

9. Обґрунтування застосування активних фільтрів

Повсюдне використання нелінійних навантажень, що включають в себе силове електронне обладнання: вентиляльні перетворювачі і пристрої частотного регулювання електроприводу, насичені трансформатори та електродвигуни, потужні електричні печі та зварювальне обладнання - призвело до необхідності розробки та впровадження систем корекції форми кривих струму і напруги. Один з перспективних методів вирішення зазначеного завдання на ПАТ «ДМК» при наявності великої кількості тиристорних перетворювачів частоти - застосування активних фільтрів.

Існують послідовна, паралельна і змішана топології підключення активних фільтрів, принципово само розрізняють два типи:

- послідовний активний фільтр;
- паралельний активний фільтр.

Послідовний активний фільтр

Послідовний фільтр, по суті, є керованим генератором напруги і служить ефективним рішенням для компенсації провалів, флікера несиметрії і гармонійних складових у напрузі мережі.

Однак він має деякі недоліки. Розрахований на повний струм навантаження, він має високу потужність і, відповідно, вартість. Крім того, не може прямо виправляти струми навантаження, підключеного за ним, впливаючи на них тільки за допомогою зміни напруги. Істотною перевагою є виправлення спотвореної форми напруги незалежно від природи виникнення спотворень.

Принцип дії та блок-схема послідовного фільтра показана на рис. 12.

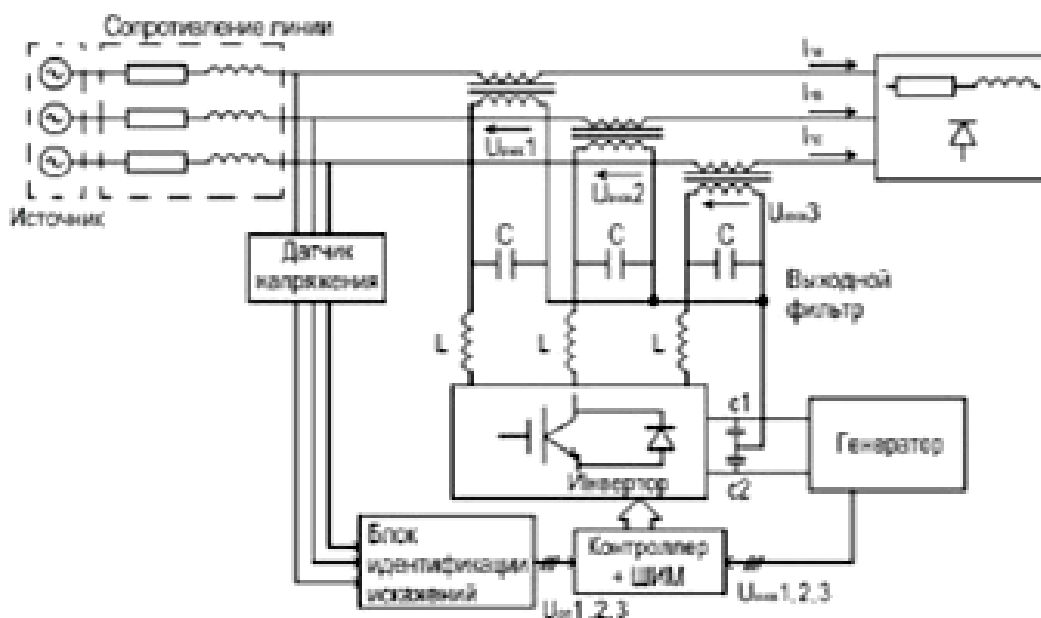


Рис. 12. Структура послідовного фільтра

Паралельний активний фільтр

Параметри паралельних фільтрів повинні бути підібрані тільки для величин гармонійних струмів від нелінійного навантаження. Ще одна перевага - принцип регулювання з корекцією струму (фільтр як регульоване джерело струму) і пов'язане з цим поліпшення напруги живлення інших споживачів. У таких мережах джерела збурень - споживані навантаженням струми (THD (I)% >> THD (U)%). Сумарні гармонійні спотворення по струму% завжди вище, ніж по напрузі. Логічно і більше швидко виправляти першопричину. Для послідовного ж фільтра в цьому випадку підходить задача зменшення впливу від зовнішніх збурень з мережі, насамперед за напругою. Це твердження можна оскаржувати, але вартісної фактор підкаже саме таку логіку дій! Таким чином, місце застосування паралельного фільтра - ближче до нелінійної навантаженні.

Спільним у побудові фільтрів є принцип регулювання по відхиленню від заданої величини, вони обидва включають в себе датчики вимірюваних сигналів і блоки формування опорних сигналів по напрузі або току - по типу фільтра, відповідно. Отже, повинні володіти значним швидкодією (0,02-0,5 мс) і часом відгуку 0,2-2 мс для мереж 50-60 Гц. Тому в якості регулюючого елемента застосовують IGBT-транзистори. Використовується також принцип ШІМ-регулювання (регулювання з використанням широтної імпульсної модуляції сигналу).

У сучасних умовах спадщини єдиної енергетичної системи, враховуючи статистику нечастих збоїв на центральних генеруючих потужностях, в передавальних мережах, видається більш цікавою завдання впливу нелінійних споживачів на власну розподільну мережу.

Якщо в мережі присутні гармоніки струму через наявність нелінійних навантажень, найкращим і універсальним способом підвищення якості електроживлення є установка паралельних активних фільтрів. Застосуємо для умов нашого підприємства фільтр на прикладі сучасної серії APF виробництва іспанської фірми CIRCUTOR.

Фільтри APF забезпечують компенсацію гармонік, асиметрії та фазового зсуву струму мережі. APF повинен бути підключений паралельно лінії живлення, як показано на рис. 13. Тоді фільтр компенсує пульсацію, асиметрію і відставання по фазі, викликані роботою нелінійного навантаження, підключеної нижче за направленням протікання струму. Принцип компенсації гармонік заснований на інжектуванні пульсуючого струму в протифазі, що знищує гармоніки, що генеруються навантаженням.

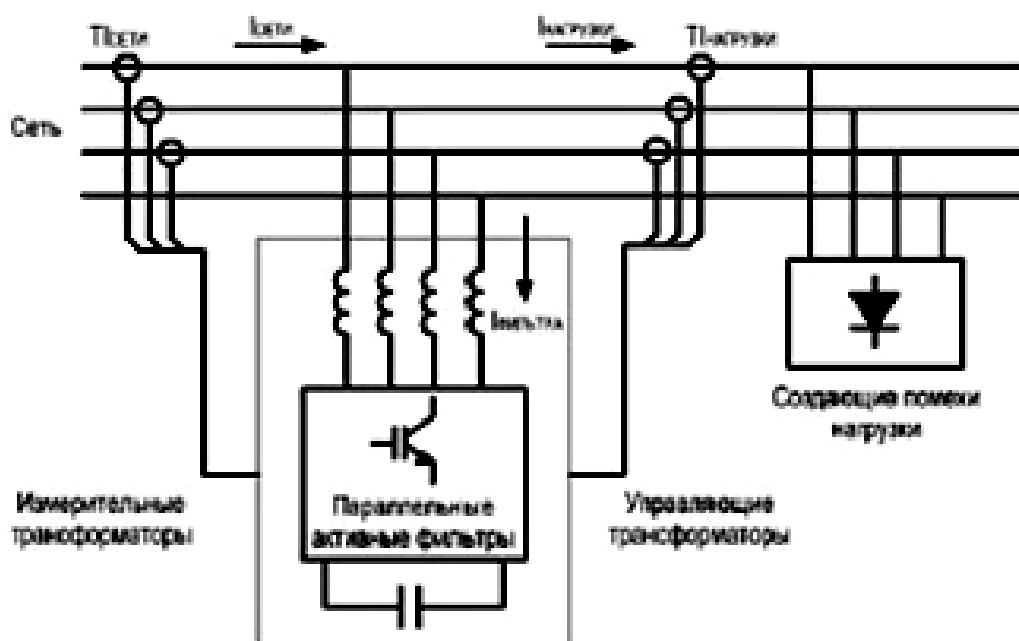


Рис. 13. Схема підключення паралельного активного фільтра APF

Типи паралельних фільтрів AF-APF

Залежно від конфігурації поділяють кілька типів паралельних активних фільтрів:

Однофазні (AF 2) - для усунення гармонік, генерованих однофазної навантаженням (2-провідні лінії), в тому числі і комп'ютерні лінії.

Трифазні 3-провідні (AF3-W) - фільтри такого типу призначені для усунення гармонік трифазної симетричною системи без нейтрального провідника - у тому числі перешкод від ДБЖ (UPS) джерел безперебійного живлення.

Трифазні 4-провідні багатофункціональні паралельні активні: фільтри APF-4W виробництва Circutor належать саме до універсального типу.

Фільтри можуть вирішити одночасно чотири завдання:

- симетрування напруг (опосередковано через симетрування струмів) мережі (Network balancing);
- пов'язане з цим зниження практично до 0 струму нейтралі;
- придушення струмових (i , отже, поліпшення THD (I) і THD (U)) гармонік;
- PF-корекція або компенсація реактивної потужності (підвищення $\cos\phi$).

Пріоритет цих функцій програмується. Конструкція містить інвертор з 4 висновками, що діє за принципом генерації зустрічного протифазного струму «дзеркальної» форми по відношенню до спотворень в струмі навантаження. Важливою особливістю конструкції APF є блоковий принцип організації потужностей, що дозволяє легко нарощувати необхідну встановлену потужність. Основною перевагою 4-провідних фільтрів є можливість компенсації всіх типів гармонік, включаючи струми нульової послідовності, і, в разі несиметричних навантажень, вони також здатні балансувати струми між різними фазами для мінімізації струму нейтралі.

Поведінка APF-фільтра в умовах обмеження струму APF-фільтри працюють в якості джерел струму та їх ефективність обмежена власним номінальним струмом. Такий обмежує струм позначається як I_{limit} і використовується для усунення гармонік, асиметрії і запізнювання фаз.

При нормальних умовах роботи, якщо необхідний струм не досягає I_{limit} , APF зкомпенсує всі реактивні складові: гармоніки, асиметрію і запізнювання фаз. Якщо навантаженні потрібно компенсація з номіналом струму вище I_{limit} , тоді компенсування запізнювання фаз (залежно від уставки) може бути автоматично відключено, а весь номінальний струм буде пущений на компенсування гармонік і запізнювання фаз. Якщо все-таки навантаженні потрібно компенсуючий струм вище I_{limit} , тоді компенсування асиметрії або гармонік (залежно від уставок) буде також автоматично відключено і вся потужність фільтра буде надана на виконання функції з найвищим пріоритетом.

У разі якщо активована тільки функція компенсування гармонік, а навантаженні потрібно струм вище I_{limit} , компенсування гармонік буде тільки частковим. Функція set-up при пуску дозволяє виконати програмування пріоритетів між функціями компенсування (гармонік, асиметрії або запізнювання фаз), крім того, можливий вибір пріоритету для компенсування окремої гармонійної складової. При правильному налаштуванні фільтр не може перевантажитися, він може тільки недовиконати в% компенсацію збурень, у разі якщо навіть його потужність була підібрана, наприклад, невірно.

Особливості застосування паралельних активних фільтрів APF

Фільтри APF розроблені спеціально для усунення гармонік, асиметрії і запізнювання фаз в низьковольтних розподільчих системах - до 1000 В з кількома однофазними навантаженнями (або міжфазними), які генерують такі реактивні складові.

Струм нейтралі фільтра APF в 1,5 рази більше фазного струму. Це означає, що в збалансованій системі APF може компенсувати до 40% третьої гармоніки по фазі без досягнення I_{limit} (max-можливого) струму на нейтралі. Для вищих гармонік залишковий струм залишається на нейтралі.

APF може бути встановлений паралельно з іншими налаштованими фільтрами або з конденсаторними установками, але тільки за умови наявності режекційних фільтрів. Компенсація $\cos\phi$ повинна забезпечуватися засмученими фільтрами з налаштуванням на $p = 7\%$, $p = 14\%$ або $p = 5,6\%$.

З вбудованим в шафу аналізатором якості і кількості електроенергії SVMk2 фільтр APF являє собою систему моніторингу та регулювання якості електричної енергії. Приклад роботи активного фільтра покажемо на рис. 14 (привід кліті).

З тимчасових діаграм струму мережі видно, що після включення активного фільтра спотворення синусоїдальності мережевого струму зменшилася.

Зовнішній вигляд активного фільтра показаний на рис. 15.

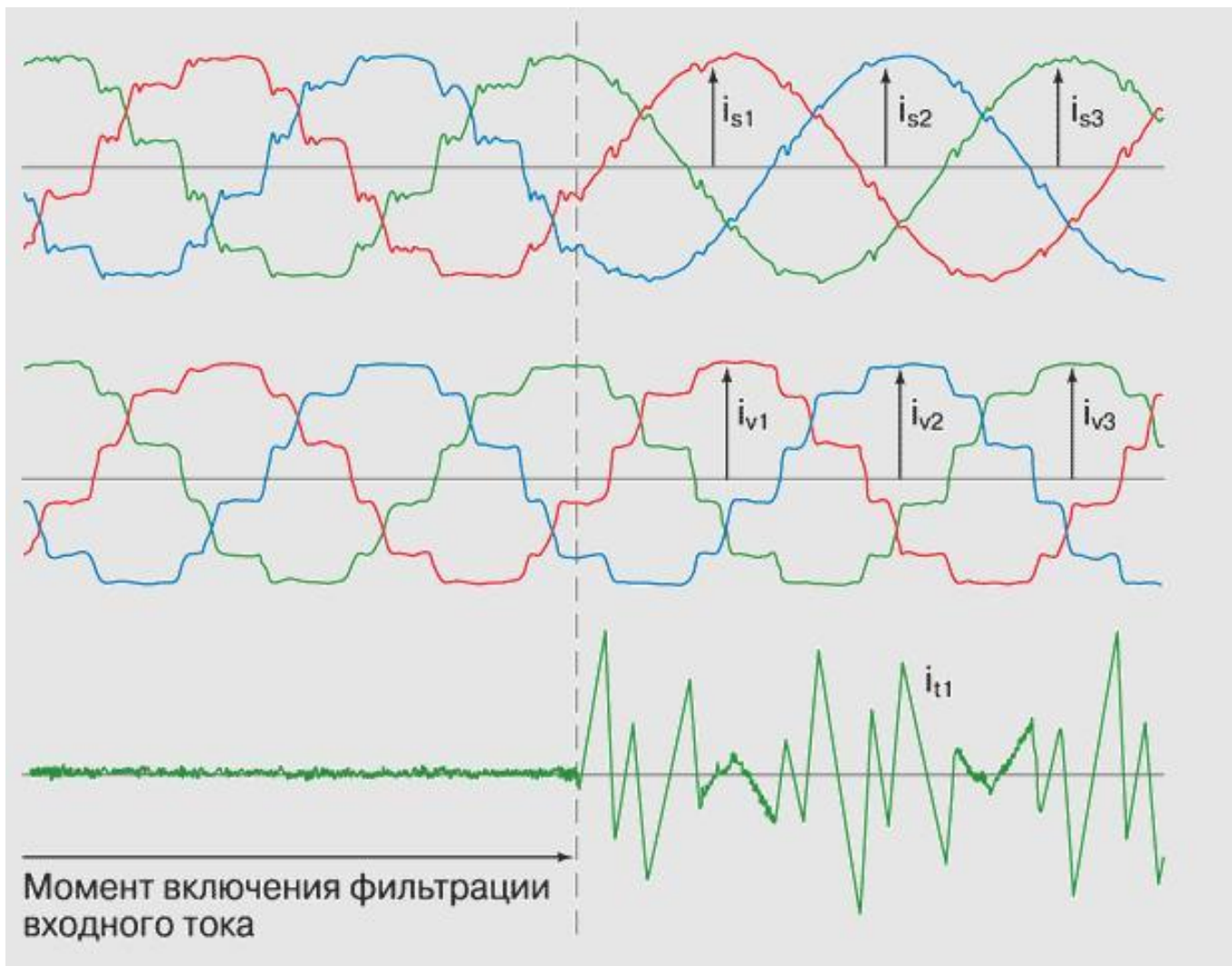


Рис. 14. Струми перетворювача кліті і активного фільтра



Рис. 15. Зовнішній вигляд активного фільтра

10. Релейний захист КБ

Захист КБ вибирається з урахуванням відстройки від струмів включення і розряду конденсаторів [1].

Для конденсаторних установок передбачають захисти від наступних видів пошкоджень і ненормальних режимів:

- багатofазних к.з.;
- надструмів перевантаження; підвищення напруги;
- однофазних замикань на землю.

Захист від багатofазних к.з. конденсаторної установки виконує струмова відсічка в двофазному, одно- або двохрелейному виконанні.

На батареях, що складаються з декількох секцій, звичайно встановлюють захист кожної секції незалежно від захисту конденсаторної установки в цілому.

Струм спрацьовування струмової відсічки і реле захисту вибирають по номінальному струму конденсаторної установки $I_{ном}$ (при цьому передбачають відстройку від кидків струму, супроводжуваних перехідні процеси при включенні).

Перевантаження конденсаторних установок можливе за наявності вищих гармонік. Тоді встановлюється максимальний струмовий захист в двофазному трьохрелейному виконанні з витримкою часу, відключаючою установку при діючому значенні повного струму $>1,3I_{ном}$.

Первинний струм спрацьовування захисту:

$$I_{с.з.} = \frac{1,05}{k_{\epsilon}} I_{ном} \leq 1,3I_{ном}$$

$$\text{де } I_{ном} = \frac{Q_{ку}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = \frac{450}{\sqrt{3} \cdot 6} = 43 \text{ A}$$

Захист конденсаторної установки від підвищення напруги виконується одним реле максимальної напруги, діючим на відключення з витримкою часу 3–5 хв. Напряга спрацьовування захисту:

$$U_{с.з.} = \frac{1,05}{k_{\epsilon}} U_{ном} \leq 1,1U_{ном}$$

$$U_{с.з.} = \frac{1,05}{k_{\epsilon}} U_{ном} = \frac{1,05}{0,8} 6 = 7,87 \text{ кВ} \leq 1,1U_{ном}$$

Повторне включення конденсаторної установки допускається після зниження напруги в мережі до номінального значення, але не раніше ніж через 5 хв після її відключення. Захист від підвищення напруги не потрібен, якщо батарея вибрана з урахуванням максимально можливої напруги мережі.

Захист конденсаторної установки від однофазних замикань на землю рекомендують застосовувати при струмах замикання на землю вище 20 А і за наявності кабельної вставки, яка сполучає установку із збірними шинами.

Виконується захист у вигляді струмової відсічки нульової послідовності. Струм спрацьовування визначають по виразу:

$$I_{c.з.} \geq k_0 k_\sigma I_{c.c.}$$

де: $k_0=1.1-1.2$ коефіцієнт відстройки;

$k_\sigma=4-5$ коефіцієнт, враховуючий кидки ємнісного струму при перехідному процесі;

$I_{c.c.}$ – власний ємнісний струм лінії, що захищається.

Уставка струму i_y , вибрана виходячи з перевантажувальної здатності конденсаторів, не повинна перевищувати 130 % $I_{ном,к}$.

За наявності в мережах вищих гармонік слід перевіряти ймовірність перевантаження конденсаторів по струму в резонансних або близьких до них режимах і передбачати заходи щодо запобігання резонансних явищ.

Для швидкого розряду конденсаторів після їх відключення застосовують індуктивні або активні розрядні опори, які підключаються паралельно конденсаторній батареї.

Повна схема захисту конденсаторної установки показана на рис. 16.

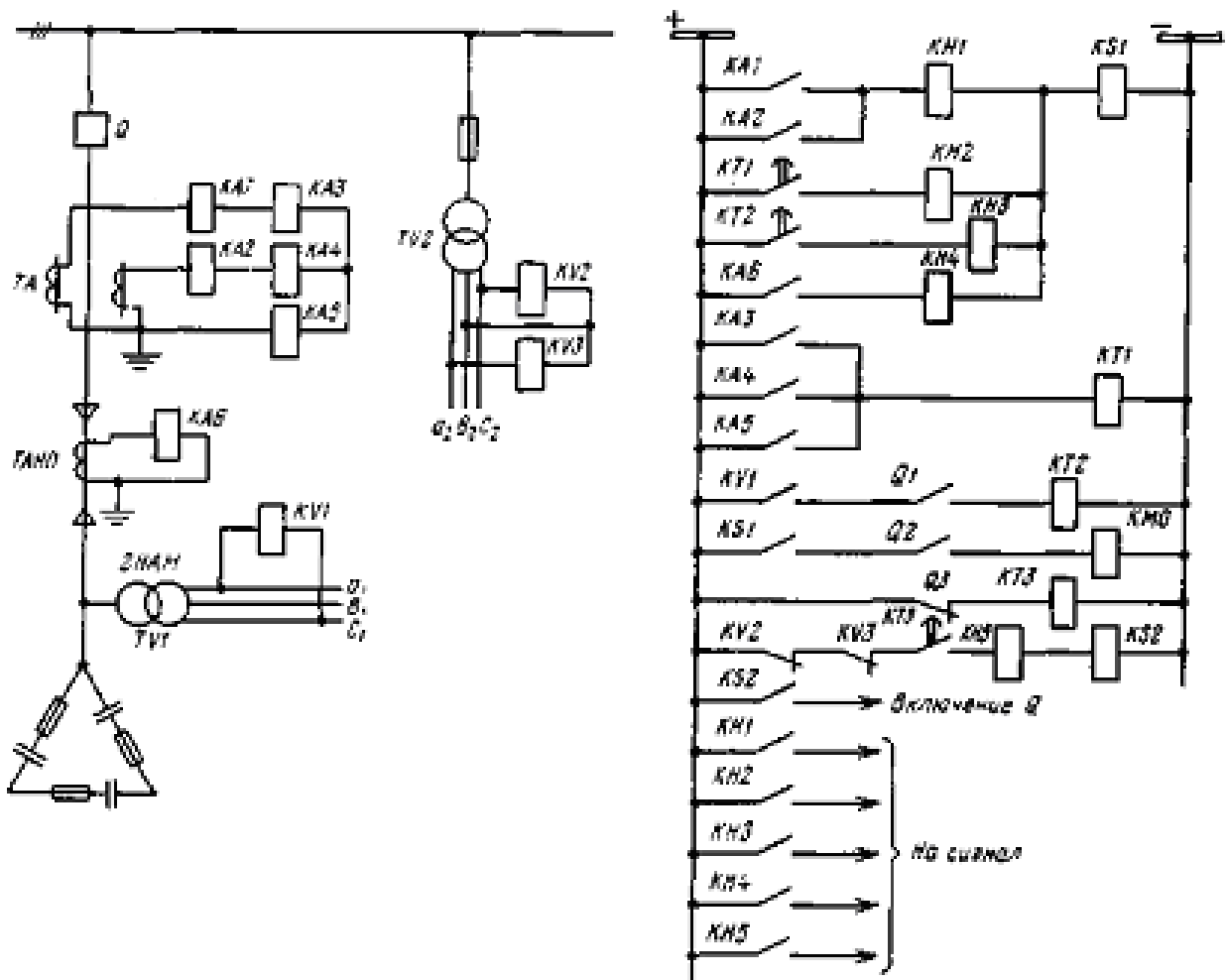


Рис. 16. Схема захисту конденсаторної установки

Висновки

1. На відміну від резонансних фільтрів, активні фільтри пригнічують всі неосновні складові струмів мереж в певному діапазоні частот, в тому числі неканонічні і низькочастотні складові.

2. Активні фільтри є багатофункціональними пристроями і, крім фільтрації струмів і напруг електромереж, можуть забезпечувати компенсацію реактивної потужності і симетрування трифазних систем струмів і напруг.

3. Різноманіття виконань фільтрів, широкі можливості формування їх параметрів дозволяють при сучасній елементній базі синтезувати активні фільтри з високими техніко-економічними показниками для використання їх в промислових електромережах та електроприводах.

ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Актуальність обраної теми дослідження у кваліфікаційній роботі полягає в створенні безпечної, якісної, надійної та економічної схеми знижувальної трансформаторної підстанції 150/6 кВ.

Запропоновано методи, які суттєво дозволять:

- уникнути аварійних ситуацій у зв'язку з підвищеною вірогідністю відмови застарілого обладнання;
- полегшити оперативні перемикання;
- підвищити безпеку праці персоналу.

Економічні показники, надійність та якість обладнання, що приймається до установки, в тому числі – іноземного виробництва, а також технічні рішення, що застосовані в проекті, підтверджують їх відповідність останнім досягненням вітчизняної та іноземної техніки.

Релейний захист на ПС виконується з використанням високотехнологічних мікропроцесорних пристроїв.

1. Розрахунок капітальних витрат

Капітальні інвестиції – це кошти, призначені для створення і придбання основних фондів і нематеріальних активів, що підлягають амортизації.

Капітальні інвестиції з реалізації технічного рішення можуть включати витрати:

- на придбання обладнання, техніки, технології, технічних засобів контролю та обліку витрачання ресурсів, приладів діагностики стану обладнання тощо;
- пов'язані з виконанням будівельно-монтажних робіт;
- на проведення монтажно-налагоджувальних робіт;
- фінансових коштів на виконання проектно-конструкторських робіт, підготовку персоналу та виконання інших робіт, необхідних для реалізації технічного рішення.

Розрахунок капітальних витрат виконаємо за показниками вартості

нового запропонованого обладнання.

Вартість монтажно-налагоджувальних робіт складає 10% від вартості електрообладнання.

Транспортно-заготівельні і складські витрати приймаються у відповідності до тарифу компанії перевізника.

Капітальні витрати розраховуються наступним чином:

$$K = K_{об} + K_{тр} + K_{мн}$$

де, $K_{об}$ - вартість обладнання, грн;

$K_{тр}$ - транспортно-заготівельні і складські витрати, грн;

$K_{мн}$ - витрати на монтажно-налагоджувальні роботи, грн.

Розрахунок капітальних витрат наведено в таблиці 1.1 за даними заводів-виробників та представників ринку електрообладнання.

Таблиця 1.1 – Економічні показники

№	Найменування	Питомі капітальні витрати тис.грн. □ шт	Кількість, шт	Капітальні витрати, тис.грн
1	Елегазовий вимикач LTB 175 D1	600	2	1200,0
2	Трансформатор ТРДЦН - 40000/150-У1	3 200	2	6400,0
3	Вимикач ВР2-10-31,5/1000У2	75	3	225
4	Вимикач ВР2-10-31,5/630У2	70	8	560
5	Роз'єднувачі РДЗ-110/1000 У1	50	2	100
6	Трансформатори струму ТОЛ-10 У2(100А)	5, 278	7	36,946
7	Трансформатори струму ТОЛ-10 У2(150А)	5, 278	1	5, 278

8	Трансформатори струму ТОЛ-10 У2(1000А)	5,700	2	11,4
9	Трансформатори струму ТЛШ-10 У3 (1000 А)	4,000	2	8
10	Трансформатори струму ТФЗМ-110А-ІУ1 (600 А)	44,550	2	89,1
11	Лічильник активної енергії САЗУ-И680	5,350	12	64,2
12	Лічильник реактивної енергії СР4-И676	5,350	12	64,2
13	Вольтметр Э350	0,350	4	1,4
14	Комірки виробництва «ЕДС-ПАУЕР» з установленим обладнанням яке йде в комплекті та узгоджене з проектними рішеннями	550	1 (комплекс)	550
Усього				9 315,5

Таблиця 1.2 - Посилання на ціни

Найменування обладнання	Постачальник
Високовольтна апаратура	Інтернет магазин Запорізького заводу високовольтної апаратури, Україна, м. Запоріжжя, Дніпровське шосе, 13 тел.: +38 (061) 220-63-71
Електротехнічна продукція	Інтернет магазин: prom.ua тел.:+380 (97) 759-68-21
Кабельна продукція, а також лічильники	Інтернет магазин: Volta м.Дніпро, вул. Шинна, 26 тел. : +38 050 320-31-11
Високовольтна та низьковольтна апаратура	УкрЕлектро Запоріжжя Запорізька область вул. Седова 8 Подробнее: https://ukrelektro.com.ua/ua/p4430526-transformator-toka-tfzm.html Рівненський завод високовольтної апаратури Подробнее: http://www.rzva.ua/ua/pro-kompaniyu_1474357097/

Монтажно-налагоджувальні роботи:

$$K_{\text{мн}} = 0,1 \cdot K_{\text{об}} = 0,1 \cdot 9\,315,5 = 931,55 \text{ тис. грн.}$$

Транспортно заготівельні і складські витрати:

Компанія перевізник, що надає послуги для нашого проекту ТОВ «DDS TRANS».

Найменування	Тариф, грн/т	Км	Адрес відправлення	Адрес доставлення	Вартість, тис.грн
Високовольтна апаратура	500	643	м.Запоріжжя	м.Могилів-Подільський	321,5
Високовольтна та низьковольтна апаратура	300	301	м.Рівне	м.Могилів-Подільський	90,3
Всього					411,8

Капітальні витрати будуть дорівнювати:

$$K = K_{об} + K_{тр} + K_{мн} = \\ 9\,315,5 + 931,55 + 411,8 = 10\,659 \text{ тис. грн}$$

2. Розрахунок експлуатаційних витрат

Експлуатаційні витрати - це поточні витрати на експлуатацію та обслуговування об'єкта за рік, виражені в грошовій формі.

Основні статті витрат:

- амортизаційні відрахування (C_a);
- заробітна плата обслуговуючого персоналу ($C_з$);
- відрахування на соціальні заходи від заробітної плати (C_c);
- інші експлуатаційні витрат ($C_{пр}$)

Таким чином загальні експлуатаційні витрати складуть:

$$Z_{екс} = C_a + C_з + C_c + C_{пр} + C_э, \text{ грн}$$

2.1 Розрахунок амортизаційних відрахувань

Річні амортизаційні відрахування C_a на основні фонди обчислюються по балансовій вартості обладнання та мінімальному (регламентованому) терміну експлуатації.

Обладнання відноситься до 4 групи, з мінімальним корисним терміном експлуатації 5 років.

Сума річних амортизаційних відрахувань буде складати

$$0,2 \cdot 10\,659 = 2\,131,8 \text{ тис.грн.}$$

2.2 Розрахунок річного фонду заробітної плати

Розрахунок річного фонду заробітної плати здійснюється за категоріями персоналу (робітники, РСС), який обслуговує об'єкт проектування, відповідно з їх чисельністю, режимом роботи, годинними тарифними ставками, посадовими

окладами, що застосовуються на підприємстві формами і системами оплати праці та преміювання.

Основна заробітна плата працівників – це винагороди за виконану роботу відповідно до встановлених норм праці (норми часу, виробітку, обслуговування, посадові обов'язки). Вона визначається тарифними ставками і відрядними розцінками для робітників, посадовими окладами для спеціалістів, службовців і керівників.

Додаткова заробітна плата – це винагорода за роботу понад встановлених норм, за особливі умови праці. До додаткової заробітної плати належать премії, пов'язані з виконанням виробничих завдань і функцій, доплати і надбавки, гарантійні і компенсаційні виплати, передбачені чинним законодавством.

Номінальний річний фонд робочого часу :

$$T_{\text{н}} = (D_{\text{к}} - D_{\text{св}} - D_{\text{вих}}) \cdot T_{\text{зм}} = (365 - 11 - 104) \cdot 8 = 2000 \text{ год}$$

де $D_{\text{к}}$ - число календарних днів;

$D_{\text{св}}$ - число святкових днів;

$D_{\text{вих}}$ - число вихідних днів;

$T_{\text{зм}}$ - тривалість зміни, год.

Результати розрахунку основної заробітної плати обслуговуючого персоналу наведені в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 Розрахунок річного фонду заробітної платні обслуговуючого персоналу

№ п/п	Найменування професій працівників	Списочний штат, чол.	Оклад, грн	Номінальний річний фонд робочого часу, год	Основна заробіт-на плата, тис.грн.
1.	Начальник цеху	1	140	2000	280
2.	Старший майстер	1	100	2000	200
3.	Майстер	5	85	2000	850
4.	Механік	2	80	2000	320
5.	Електромонтер	4	80	2000	640
6.	Робочий	6	75	2000	900
Всього:					3190

Додаткова заробітна плата обслуговуючого персоналу визначається в розмірі 10-15% від основної заробітної плати.

$$Z_{\text{доп}} = 0.15 \cdot Z_{\text{осн}} = 0,15 \cdot 3190 = 478,5 \text{ тис.грн.}$$

Таким чином, загальна величина річного фонду заробітної плати становить:

$$C_3 = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}} = 3190 + 478,5 = 3668,5 \text{ тис. грн.}$$

де $Z_{\text{осн}}$, $Z_{\text{доп}}$ – основна і додаткова заробітна плата відповідно, грн.

2.5. Розрахунок відрахувань на соціальні заходи

Відрахування на соціальні заходи (єдиний соціальний внесок) визначаються на підставі встановленого чинним законодавством відсотка від суми основної та додаткової заробітної плати. Ставка цього внеску складає 22% від фонду оплати праці.

$$C_c = 0,22 \cdot C_3 = 0,22 \cdot 3668,5 = 807,07 \text{ тис. грн.}$$

2.6. Визначення інших витрат

Інші витрати по експлуатації об'єкту проектування включають витрати з охорони праці, на спецодяг та ін. Відповідно до практики, ці витрати визначаються в розмірі 4% від річного фонду заробітної плати обслуговуючого персоналу. $C_{\text{пр}} = 0,04 \cdot C_3 = 0,04 \cdot 3668,5 = 146,74$ тис. грн.

2.5. Розрахунок вартості спожитої електроенергії

Вартість електроенергії, споживаної об'єктом проектування протягом року, визначається виходячи з його встановленої потужності, річного фонду робочого часу об'єкта проектування, втрат електроенергії та тарифу за формулою:

$$C_3 = W_p \cdot C_e, \text{ грн.},$$

де W_p – кількість спожитої за рік електроенергії, кВт • год;

C_e – тариф на електроенергію станом на конкретну дату, грн. / кВт • год;

Якщо на підприємстві використовується багатозонний облік електроенергії, то W_p розподіляється за зонами обліку і в кожній з них застосовується свій тариф на електроенергію.

Річний фонд робочого часу об'єкта проектування (F_n) визначається режимом роботи технологічних процесів, які він обслуговує, і може не збігатися з річним фондом робочого часу працівників. Розрахунок F_n наводиться в пояснювальній записці.

Станом на 08.10.2022 тариф на послуги з споживання електричної енергії дорівнює 1,68 грн/кВт•год.

$$C_3 = W_p \cdot C_e = 60,1 \cdot 365 \cdot 1,68 = 36\,853,32 \text{ грн}$$

Таким чином загальні експлуатаційні витрати складуть :

$$C_{\text{екс}} = C_a + C_3 + C_c + C_{\text{пр}} + C_3 =$$

$$2\,131,8 + 3668,5 + 807,07 + 146,74 + 36,8 = 6\,790,91 \text{ тис.грн.}$$

Висновок

В економічному розділі було проведено:

- розрахунок капітальних витрат, які становлять 10 659 тис. грн.
- розрахунок суми витрат на експлуатацію, яка становить 6 790,91 тис.грн.

На протязі всього строку служби проект сприяти:

- зниженню вірогідності аварійних ситуацій;
- продовженню строку служби обладнання;
- зниженню витрат на технічне обслуговування та планові роботи.

ВИСНОВКИ

Об'єктом в даній кваліфікаційній роботі є система електропостачання промислового підприємства великої потужності.

В кваліфікаційній роботі була поставлена та вирішена задача застосування в системі електропостачання підприємства способів централізованого регулювання напруги та нормалізації несинусоїдальності та несиметрії для зниження технологічних втрат електроенергії.

У роботі передбачається установка батарей конденсаторів з можливістю автоматичного регулювання по напрузі реактивної потужності що генерується в мережу.

Новизна і актуальність ухвалений проектний рішення полягає в застосуванні сучасних автоматичних регуляторів напруги і високоякісних батарей конденсаторів.

Запропоновані рішення приведуть до зниження оплати за спожиту підприємством реактивну електроенергію, а також забезпечать якість електроенергії, яку вимагає ГОСТ, особливо для віддалених електроприймачів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Правила улаштування електроустановок. – Київ, 2017. -617 с.
2. Перехідні процеси в системах електропостачання: підручник / Г.Г. Півняк, І.В. Жежеленко, Ю.А. Папаїка, Л.І. Несен; за ред. Г.Г. Півняка; М-во освіти і науки України, Нац. Гірн. Ун-т. – 5-те вид., доопрац. і допов. –Дніпро: НГУ, 2016. – 600 с.
3. Електромагнітна сумісність у системах електропостачання: Підручник / І.В. Жежеленко, А.К. Шидловський, Г.Г. Півняк, Ю.Л. Саєнко. – Д.: Нац. гірнич. ун-т, 2009. – 319 с.: іл.
4. Півняк Г.Г., Шидловский А.К., Кігель Г.А., Рыбалко А.Я., Хованська О.І. Особливі режими електричних мереж. – Дніпропетровськ: НГА України, 2004. – 375 с.
5. Г.Г. Півняк, М.М. Білий, Г.М. Бажін. Електропостачання гірничих підприємств: Довідковий посібник. – Д.: Національний гірничий університет, 2008, - 550 с.
6. Перехідні процеси в системах електропостачання. Підручник. Вид. 2-е, 3-є, доопрац. та допов. / Г.Г.Півняк, В.М.Вінославський, А.Я.Рибалко, Л.І.Несен / за ред. академіка НАН України Г.Г.Півняка. – Дніпропетровськ: НГАУ, 2000, 2003. – 597 с.
7. Transients in Electric Power Supply Systems. Textbook for institutions of higher education: under the editorship of G.G.Pivnyak / G.G.Pivnyak, I.V.Zhezhelenko, Y.A.Papaika; Ministry of Education and Science of Ukrainian, National Mining University – 5-th edition, revised and expanded: Translation from Ukrainian. – Trans Tech Publications Ltd, Switzerland, 2016. – 382 p.
8. Transients in Electric Power Supply Systems. Volume 1: the textbook for institutions of higher education / G. Pivnyak, V. Vinoslavskiy, A. Rybalko, L. Nesen; under the general editorship of G. Pivnyak, Academician of National Academy of Sciences of Ukraine. Editorship of the English version and terminology by Professors O. Ivanov and S. Kostritskaya – 4th edition: Translation from Ukrainian. –

Dnipropetrovsk: National Mining University. – 2005. – 248 pp.

9. Transients in Electric Power Supply Systems. Textbook for institutions of higher education / G. Pivnyak, V. Vinoslavskiy, A. Rybalko, L. Nesen, V. Procopenko; under the general editorship of G. Pivnyak, Academician of National Academy of Sciences of Ukraine. Editorship of the English version and terminology by Professors O. Ivanov and S. Kostritskaya – 5th edition: Translation from Ukrainian. – Dnipropetrovsk: National Mining University. – 2009. – 406 pp.

10. Півняк Г.Г., Волотковська Н.С., Кігель Г.А. Розрахунки електричних мереж систем електропостачання. – НГУ, 2011.

11. Кігель Г.А, Півняк Г.Г. Електричні мережі систем електропостачання. – НГУ, 2011.

12. Експлуатація електроустановок: Навч. посібник / Г.Г. Півняк, А.В. Журахівський, Г.А. Кігель, Б.М. Кінаш, А.Я Рибалко, Ф.П. Шкрабець, З.М. Бахор; За ред. академіка НАН України Г.Г. Півняка. –Дніпропетровськ, НГУ, 2005.

13. Перхач В.С. Математичні задачі електроенергетики. Л.: Вища шк., 1981.

14. Сегеда М.С. Електричні мережі та системи. – Л.: НМК ВО «Каменярь», 1999.

Додаток

		Позначення	Назва	Кількість арк	Прим
1					
2			Документація		
3					
4		ЕЕ.КРМ.22.ПЗ	Пояснювальна записка	66	А4
5					
6			Графічні матеріали		
7					
8	A1	ЕЕ.КРМ 22.01.ГМ		1	
9	A1	ЕЕ.КРМ 22.02.ГМ		1	
10	A1	ЕЕ.КРМ 22.03.ГМ		1	
11	A1	ЕЕ.КРМ 22.04.ГМ		1	