


**ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ У
СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ**

**методичні рекомендації до виконання
індивідуальних завдань з дисципліни**

Запоріжжя 2025



УДК 621.316(072)
Е50

Рекомендовано Науково-методичною
радою ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
(протокол № 8 від 27.06.2025 р)

Автори:

ПАПАЙКА Юрій, доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем;
ЛИСЕНКО Олександра, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем.

Рецензент:

Луценко І.М. – канд. техн. наук, професор кафедри електроенергетики НТУ «Дніпровська політехніка».

У50 Електромагнітна сумісність систем електрозабезпечення : методичні вказівки до виконання індивідуальних завдань з дисципліни / уклад.: Ю. А. Папаїка, О. Г. Лисенко. Запоріжжя : ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2025. 61 с.

Методичні вказівки включають пояснення щодо процедури підготовки, виконання і захисту індивідуальної роботи, а також рекомендації і вимоги до її змісту та оформлення. Призначено для здобувачів освіти спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка другого (магістерського) рівня освіти ОПП «Енергоефективні технології в системах електрозабезпечення гірничих та металургійних підприємств».

УДК 621.316(072)

© ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2025
© Папаїка Ю.А., Лисенко О.Г., 2025



ЗМІСТ

ВСТУП	4
1 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ.....	6
Аналіз джерел електромагнітних завад.....	6
2 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА.....	7
2.1 Складання схем заміщення та розрахунок показників якості напруги	7
2.2 Аналіз шкідливого впливу несиметрії та несинусоїдальності напруги на систему електропостачання підприємства	20
2.3 Розробка технічних засобів покращення якості напруги	23
2.4 Розрахунок додаткових втрат активної потужності.....	28
2.5 Розрахунок річних збитків від неякісної електроенергії.....	35
2.6 Зміст індивідуального завдання №1	36
2.7 Зміст індивідуального завдання №2.....	36
3 ВАРІАНТИ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ЗАВДАННЯ.....	37
ВАРІАНТ №1.....	37
ВАРІАНТ №2.....	39
ВАРІАНТ №3.....	41
ВАРІАНТ №4.....	43
ВАРІАНТ №5.....	45
ВАРІАНТ №6.....	47
ВАРІАНТ №7.....	49
ВАРІАНТ №8.....	51
ВАРІАНТ №9.....	53
ВАРІАНТ №10.....	55
4 ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ.....	57
РЕКОМЕНДОВАНІ ДЖЕРЕЛА.....	58
ДОДАТОК А. СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ МЕРЕЖІ	59
ДОДАТОК Б. СХЕМИ УЛАШТУВАННЯ	60



ВСТУП

Під сумісністю суб'єктів різних видів діяльності або процесів розуміють комфортне існування кожного з них при відсутності неприпустимого впливу на інші суб'єкти. У системах електропостачання електрообладнання, прилади, апарати та інші пристрої знаходяться в загальному для них електромагнітному середовищі, при чому будь-який з пристроїв є джерелом (генератором) електромагнітних завад (ЕМП), і в той же час на нього впливають завади, створювані іншими джерелами.


У загальному випадку електромагнітна завада характеризується як вплив, що спотворює основний сигнал і небажано впливає (чи що може впливати) на нього. Основний сигнал - це корисний сигнал, що визначається принципом дії електроприймача, його системи управління та захисту.

Електрична мережа і система електропостачання підприємства є електромагнітним середовищем, в якому відбувається генерування, розповсюдження та вплив електромагнітних завад на електроприймачі. Тому виникає задача електромагнітної сумісності, під якою розуміється здатність електрообладнання, апаратів і приладів нормально функціонувати в електромагнітному середовищі, не створюючи неприпустимих перешкод для іншого обладнання, яке функціонує в тому ж середовищі.

Переважаючі кондуктивні електромагнітні перешкоди в мережах трифазного змінного струму визначаються спотвореннями синусоїдальної форми кривих напруги і струму, діючого значення напруги (відхилення, коливання і несиметрія напруги), провалами і імпульсами напруги. Значення завад прийнято називати показниками електромагнітної сумісності або показниками якості електроенергії.

Якість електроенергії - це сукупність її властивостей, що визначають вплив на електрообладнання, прилади та апарати і оцінюється показниками якості електроенергії, чисельно характеризують рівні електромагнітних завад по частоті, діючому значенню напруги, формі його кривої, симетрії і імпульсам напруги. Це визначення якості електроенергії як товару відповідає поняттю якості продукції як сукупність властивостей, що обумовлюють придатність продукції до задоволення певних потреб відповідно до показників якості електроенергії, які встановлені нормативними документами.

Енергосистема, призначена для виробництва, передачі, розподілу електроенергії та перетворення її в енергію інших видів, містить більшу кількість джерел електромагнітних завад: лінії електропередачі, розподільні пристрої (підстанції) з комутаційними апаратами, шинопроводи, кабелі, електроприймачі, технічні засоби автоматизації, управління, захисту і зв'язку.



Сталі електромагнітні процеси, що характеризуються перешкодами з частотою від декількох герц до 100 ГГц, створюються усіма енергетичними установками, повітряними і кабельними лініями електропередачі всіх номінальних напруг, пристроями електропостачання змінної та багатофазної напруги, випрямними приладами та пристроями, колекторними і комутаційними системами електричних машин, люмінесцентними лампами, комутаційними мережевими пристроями, комп'ютерними системами, установками індукційного нагріву, зварювання, пристроями радіозв'язку, радіопереговорними апаратами, системами радіоуправління і т.д.

У разі перевищення нормованих рівнів електромагнітні завади можуть призвести до порушення завадостійкості технічних засобів (зокрема, пристроїв мікропроцесорного релейного захисту) на електростанціях і підстанціях.

Тема індивідуального завдання - провести аналіз системи електрозабезпечення підприємства і споживачів, які вносять електромагнітні завади в електричну мережу; розрахувати показники якості напруги за несиметрією і несинусоїдальності; розробити технічні засоби поліпшення якості напруги, розрахувати збитки від неякісної напруги.

Мета методичних вказівок полягає у наданні теоретико-практичної підтримки студентам під час самостійного виконання індивідуальних завдань, формуванні в них навичок застосування сучасних методів оцінки показників електромагнітної сумісності.

Виконання індивідуальних завдань впливає на формування у майбутніх фахівців знань і навичок, необхідних для проєктування та експлуатації сучасних систем електрозабезпечення.

Індивідуальні завдання передбачають самостійне виконання студентами практичних розрахунків, спрямованих на поглиблення теоретичних знань та розвиток практичних навичок моделювання показників EMC.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Аналіз джерел електромагнітних завад

У цехах сучасних промислових підприємств і в сфері послуг застосовуються вентильні перетворювачі, різного роду перетворювачі частоти, побутові прилади, що працюють як в статичних, так і перехідних режимах. Вони є потужними генераторами електромагнітних завад (ЕМП), як і нелінійні навантаження типу дугових сталеплавильних печей, електрозварювальних установок, вітроелектростанцій, силових трансформаторів і електродвигунів.

Перетворювачі частоти (ПЧ) в останні роки знаходять все більш широке застосування в металургії, машинобудуванні, на підприємствах легкої промисловості; перетворювачі частоти є джерелами гармонійних електромагнітних завад - не тільки вищих гармонік (ВГ), але і так званих інтергармонік (ІГ), частоти яких знаходяться між частотами канонічних ВГ. На рисунку 1 представлена структурна схема ПЧ з ланкою постійного струму (ПЧП), який складається з двох вентильних систем - випрямляча В і інвертора І (як правило, інвертора напруги). Ланка постійного струму включає індуктивність L_d і ємність C . Випрямляч і інвертор можуть бути керовані і некеровані, відповідні системи управління (якщо вони є) можуть бути незалежними або пов'язаними між собою. Потужні ПЧП оснащуються згладжуючим реактором L_d , призначеним для зменшення пульсацій струму I_d , а в малопотужних перетворювачів зв'язок випрямляча і інвертора здійснюється тільки за допомогою конденсатора C . У всіх випадках ПЧП підключаються до мережі безпосередньо, тобто без спеціального трансформатора.

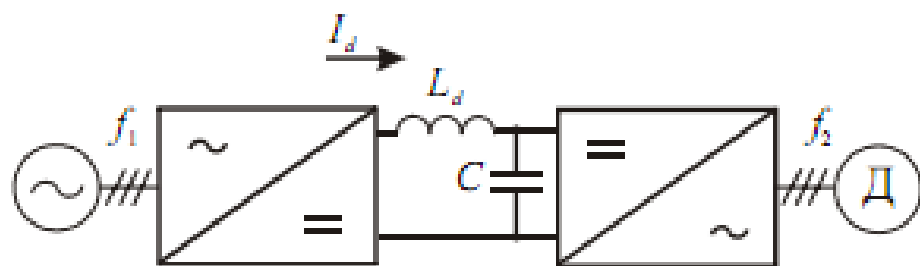


Рисунок 1 – Структурна схема ПЧП

Дугова вакуумна піч (ДВП) і піч електрошлакового переплаву (ПЕШП) є значним джерелом електромагнітних завад: ВГ і ІГ, коливань і несиметрії напруг. У найбільшій мірі генерування ЕМП проявляється в період розплавлення. Несиметрія напруги на шинах ДВП і ПЕШП, в залежності від напруги живлення, досягає 5 - 6% для мереж 6-10-35 кВ і 3% - для мереж 110 кВ. Для тих же випадків значення дози флікера (мигання) знаходиться, як правило, в межах 1,5-10.

2 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

2.1 Складання схем заміщення та розрахунок показників якості напруги

Розрахунок показників несиметрії в точках К1, К2, К3.

Розрахунок несиметрії напруги в системі електропостачання (СЕР) ведеться по опорам зворотної послідовності. В даній схемі головне джерело несиметрії - це однофазна піч електрошлакової переплавки.

Розрахунок починаємо з складання схеми заміщення (рис. 2). Джерела несиметрії в схемі представляються у вигляді джерел струму.

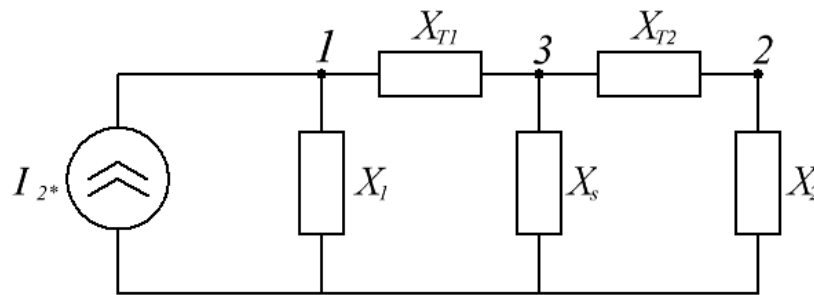


Рисунок 2 – Схема заміщення зворотної послідовності мережі

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:

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

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;

$$Z_{2\Sigma*} = \frac{\sqrt{(4 \cdot 0,7 + 6 \cdot 0,7)^2 + (4 \cdot 0,71 + 6 \cdot 0,71 - 8 \cdot 1)^2}}{\sqrt{(4 \cdot 0,7 \cdot 0,6 + 6 \cdot 0,7 \cdot 1)^2 + (4 \cdot 0,71 \cdot 0,6 + 6 \cdot 1 \cdot 0,7 - 8 \cdot 1 \cdot 1)^2}} = 2,7 \text{ в.о.}$$

Аргумент опору зворотної послідовності:

$$\begin{aligned}\arg Z_{2\Sigma^*} &= \arctg \frac{\sum_{i=1}^n S_{\text{ном}i} y_i \sin \varphi_i}{\sum_{i=1}^n S_{\text{ном}i} y_i \cos \varphi_i} = \\ &= \arctg \frac{(4 \cdot 0,6 \cdot 0,71 + 6 \cdot 1 \cdot 0,71 - 8 \cdot 1 \cdot 1)}{(4 \cdot 0,6 \cdot 0,7 + 6 \cdot 1 \cdot 0,7)} = -19,09^\circ\end{aligned}$$

Повний опір зворотної послідовності в точці К1:

$$\begin{aligned}\dot{Z}_{2(1)} &= 2,7e^{j19,09^\circ}; \\ \dot{Z}_{2(1)} &= 2,7 \cdot \cos(19,09) + j2,7 \cdot \sin(19,09) = 2,59 + j0,89.\end{aligned}$$

Для розрахунку опорів елементів схеми заміщення приймаємо базисні умови: $S_{\bar{6}} = 10$ МВА; $U_{\bar{6}} = 6,3$ кВ.

Базисний струм:

$$I_{\bar{6}} = \frac{S_{\bar{6}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\bar{6}}} = \frac{10}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 0,916 \text{ кА}.$$

Опір трансформаторів (трансформатор типу ТДН-16000/110):

$$X_{T1} = X_{T2} = \frac{U_{\kappa}}{100} \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{S_{\text{нм}}},$$

U_{κ} – напруга досліду короткого замикання трансформатора, %;

$S_{\text{нм}}$ – номінальна потужність трансформатора, МВА;

$S_{\bar{6}}$ – базисна потужність;

$$X_{T1} = X_{T2} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{10}{16} = 0,0687.$$

Опір системи:

$$X_{s^*} = \frac{S_{\bar{6}}}{S_{\kappa 3}},$$

де $S_{\kappa 3}$ – потужність короткого замикання на стороні високої напруги (ВН);

$$X_{s^*} = \frac{10}{1200} = 0,0083.$$

Повний опір зворотної послідовності в точці K2:

$$\dot{Z}_{2(2)} = \dot{Z}_{2*} \cdot \frac{S_{\sigma}}{S_{H2}},$$

де \dot{Z}_{2*} - відносний повний опір зворотної послідовності;
 S_{H2} – повна потужність навантаження, МВА;

$$\dot{Z}_{2(2)} = (0,5 + j0,56) \cdot \frac{10}{6} = 0,83 + j0,93.$$

Відносне значення струму зворотної послідовності приведене до базисних умов:

$$I_{2(\sigma)} = I_{*2} \cdot \frac{S_{H(\text{ПЄПШ})}}{S_{\sigma}},$$

де I_{*2} – відносне значення струму зворотної послідовності;
 $S_{H(\text{ПЄПШ})}$ – повна номінальна потужність печі електрошлакового переплаву, МВА;

$$I_{2(\sigma)} = 1,4 \cdot \frac{6}{10} = 0,56.$$

Точка K1

Сумарний еквівалентний опір зворотної послідовності:

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{*2\Sigma(1)} &= \frac{\dot{Z}_{2(1)} \left(jX_{T1} + \frac{jX_{s*}(jX_{T2} + \dot{Z}_{2(2)})}{jX_{s*} + jX_{T2} + \dot{Z}_{2(2)}} \right)}{\dot{Z}_{2(1)} + jX_{T1} + \frac{jX_{s*}(jX_{T2*} + \dot{Z}_{2(2)})}{jX_{s*} + jX_{T2*} + \dot{Z}_{2(2)}}} = \\ &= \frac{2,59 + j0,83 \cdot \left(j0,0687 + \frac{j0,0083(j0,0687 + 0,83 + j0,93)}{j0,0083 + j0,0687 + 0,83 + j0,93} \right)}{2,59 + j0,83 + j0,0687 + \frac{j0,0083(j0,0687 + 0,83 + j0,93)}{j0,0083 + j0,0687 + 0,83 + j0,93}} = \\ &= 0,008017 + j0,076 = 0,076e^{j83,97^\circ} \end{aligned}$$

Формули переводу комплексних чисел:

$$\begin{aligned} c = a + jb &= \sqrt{a^2 + b^2} e^{j \arctg b/a} = c e^{j\varphi} \\ a &= c \cdot \cos\varphi \end{aligned}$$

$$b = jc \cdot \sin\varphi$$

$$\varphi = \arctg \frac{b}{a}$$

Коефіцієнт несиметрії:

$$K_{2U(1)} = \left| \dot{Z}_{2\Sigma(1)} \right| \cdot I_{2(\sigma)} = 0,076 \cdot 0,56 = 0,042 = 4,2\%.$$

Точка К3

Опір зворотної послідовності:

$$\begin{aligned} Z_{2\Sigma(3)} &= \frac{jX_{s^*}(jX_{T2} + \dot{Z}_{(2)2})}{jX_{s^*} + jX_{T2} + \dot{Z}_{(2)2}} = \frac{j0,0083 \cdot (j0,0687 + 0,83 + j0,93)}{j0,0083 + j0,0687 + 0,83 + j0,93} = \\ &= 0,0000056 + j0,0082 = 0,0082e^{j89,96^\circ}. \end{aligned}$$

Струм зворотної послідовності в трансформаторі Т1:

$$\begin{aligned} I_{2(T1)} &= I_2 \left| \frac{\dot{Z}_{2(1)}}{\dot{Z}_{2(1)} + jX_{T1} + \frac{jX_{s^*}(jX_{T2} + Z_{2(2)})}{jX_{s^*} + jX_{T2} + Z_{2(2)}}} \right| = \\ &= 0,56 \cdot \left| \frac{2,59 + j0,89}{2,59 + j0,89 + j0,0687 + \frac{(j0,0687 + 0,83 + j0,93) \cdot j0,0083}{j0,0687 + 0,83 + j0,93 + j0,0083}} \right| = 0,558. \end{aligned}$$

Коефіцієнт несиметрії:

$$K_{2U(3)} = \left| \dot{Z}_{2\Sigma(3)} \right| \cdot I_{2(T1)} = 0,0082 \cdot 0,558 = 0,0045 = 0,45\%.$$

Точка К2

Опір зворотної послідовності:

$$\dot{Z}_{2\Sigma(2)} = \dot{Z}_{2(2)} = 0,83 + j0,93 = 1,24e^{j48,25^\circ}.$$

Струм зворотної послідовності в трансформаторі Т2:

$$I_{2(T2)} = I_{2(T1)} \cdot \left| \frac{jX_{s^*}}{jX_{s^*} + jX_{T2} + \dot{Z}_{2(2)}} \right| = 0,558 \cdot \left| \frac{j0,0083}{j0,0083 + j0,0687 + 0,83 + j0,93} \right| = 0,0087.$$

Коефіцієнт несиметрії:

$$K_{2U} = \left| \dot{Z}_{2\Sigma(2)} \right| \cdot I_{2(T2)} = 1,24 \cdot 0,0087 = 0,0107 = 1,07\%.$$

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

Одним з найбільш доступних і широко використовуваних способів зниження несиметрії є нерівномірний (2-х фазний) розподіл ємностей батарей конденсаторів (БК). Сумарна потужність ємнісного симетруючого пристрою вибирається з умов компенсації реактивної потужності. Вона перерозподіляється по фазах таким чином, щоб струм зворотної послідовності несиметричної БК компенсував струм зворотної послідовності несиметричного навантаження. Для визначення фазності підключення БК використовуємо діаграму розподілу аргументу струму зворотної послідовності (рис. 3).

Сумарна потужність БК:

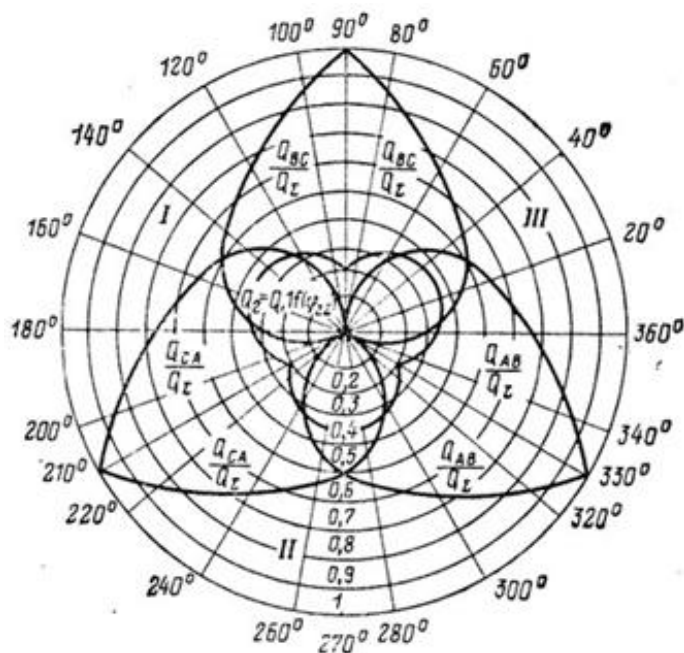
$$Q_{\Sigma} = 2\sqrt{3} \cdot K \cdot I_2 \cdot U_n \cdot \sin(\psi_2 + \xi),$$

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;

ξ – кут, який залежить від аргументу струму зворотної послідовності, розміщений на ділянках I, II и III (рис.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 $330^\circ \leq \varphi_2 \leq 90^\circ$

Рисунок 3 – Діаграма розподілу аргументу φ_2 струму зворотної послідовності I_2

Струм зворотної послідовності переведений в іменовані одиниці:

$$I_2 = I_{2(\phi)} \cdot I_\phi = 0,56 \cdot 916 = 502,96 \text{ А.}$$

Струм зворотної послідовності несиметричного навантаження:

$$\dot{I}_2 = I_2 \cdot \cos \psi_2 + jI_2 \cdot \sin \psi_2,$$

де $\cos \psi_2$ – коефіцієнт потужності печі електрошлакового переплаву;

$$\dot{I}_2 = 502,96 \cdot 0,7 + j502,96 \cdot 0,71 = 352,1 + j357,1.$$

Кут струму зворотної послідовності несиметричного навантаження:

$$\psi_2 = \arctg \frac{352,1}{357,1} = 44,6^\circ.$$

$$Q_\Sigma = 2\sqrt{3} \cdot 1 \cdot 502,96 \cdot 6 \cdot \sin(44,6 + 60) = 10116 \text{ квар.}$$

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:

$$Q_{БКВС} = K_{BC} \cdot Q_\Sigma = 0,55 \cdot 10,116 = 5,56 \text{ Мвар.}$$

Реактивна потужність підключена до фаз А і В:

$$Q_{БКВС} = K_{AB} \cdot Q_{\Sigma} = 0,45 \cdot 10,116 = 4,55 \text{ Мвар.}$$

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.

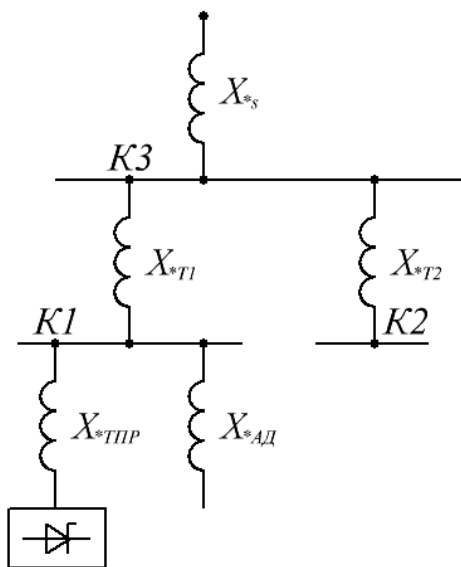


Рисунок 4 – Схема заміщення мережі

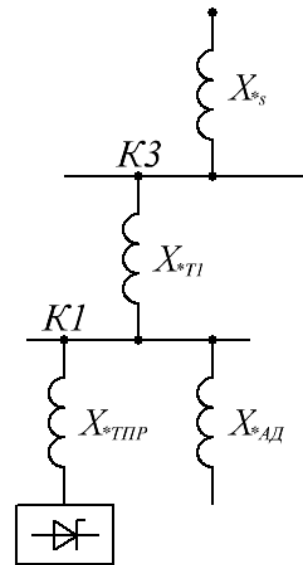


Рисунок 5 – Схема заміщення мережі приведена до точки К3

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

Опір трансформаторів (трансформатор типу ТДН-16000/110):

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

U_k – напруга випробування короткого замикання трансформатора, %;

$S_{нт}$ – номінальна потужність трансформатора, МВА;

S_6 – базисна потужність;

$$X_{T1} = X_{T2} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{10}{16} = 0,0687.$$

Опір системи:

$$X_{s*} = \frac{S_{\bar{o}}}{S_{K3}},$$

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

$$X_{s*} = \frac{10}{1200} = 0,00833.$$

Опір трансформатора перетворювача:

$$X_{*ТПР} = \frac{U_{\kappa}}{100} \cdot \left(1 + \frac{K_p}{4}\right) \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{S_{нТПР}},$$

де $K_p=0$ для 6-ти фазної схеми перетворювача;
 $S_{нТПР}$ – номінальна потужність трансформатора перетворювача;

$$X_{*ТПР} = \frac{14}{100} \cdot \left(1 + \frac{0}{4}\right) \cdot \frac{10}{16} = 0,0875.$$

Опір двигуна:

$$X_{*АД} = X'_{Д} \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{S_{АД} / \cos \varphi},$$

де $X'_{Д}$ - перехідний опір двигуна;

$S_{АД}$ – потужність високовольтних асинхронних двигунів, МВт;

$$X_{*АД} = 0,12 \cdot \frac{10}{2 \cdot 0,8 / 0,85} = 0,63.$$

Еквівалентуємо схему відносно точки К3 (рис. 5).
 Сумарний опір наведений до точки К3:

$$X_{*\Sigma} = \frac{X_{*s} \cdot X_{*T2}}{X_{*s} + X_{*T2}} = \frac{0,0083 \cdot 0,0687}{0,0083 + 0,0687} = 0,0074.$$

Еквівалентуємо схему відносно точки К1 (рис. 6).

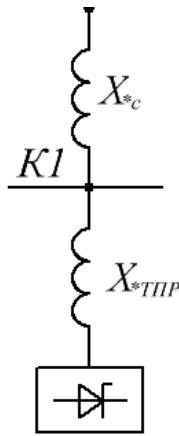


Рисунок 6 – Схема заміщення мережі приведена до точки K1

Сумарний опір наведений до точки K1:

$$X_{*c} = \frac{(X_{*\Sigma} + X_{*T1}) \cdot X_{*AD}}{X_{*\Sigma} + X_{*T1} + X_{*AD}} = \frac{(0,0074 + 0,0687) \cdot 0,63}{0,0074 + 0,0687 + 0,63} = 0,067 .$$

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

Точка K1

$$K_{UK1} = X_{*c} \cdot \sqrt{\frac{3}{\pi} \cdot \frac{\sin \varphi}{X_{*c} + X_{*ТПР}} - \frac{9}{\pi^2}} = 0,067 \cdot \sqrt{\frac{3}{\pi} \cdot \frac{0,63}{0,067 + 0,0875} - \frac{9}{\pi^2}} = 0,11 = 11\%.$$

Знаючи коефіцієнт викривлення синусоїдальності в точці K1 можливо визначити даний коефіцієнт в будь-якій точці.


Точка K3

$$K_{UK3} = K_{UK1} \cdot \frac{X_{*\Sigma}}{X_{*T1} + X_{*\Sigma}} = 0,11 \cdot \frac{0,0074}{0,0687 + 0,0074} = 0,01 = 1\%.$$

Точка K2

$$K_{UK2} = K_{UK3} \cdot \frac{X_{*T2}}{X_{*T2} + X_{*s}} = 0,01 \cdot \frac{0,0687}{0,0687 + 0,00833} = 0,008 = 0,8\%.$$

Оскільки показники несинусоїдальності в точці K1-11% перевищують значення ГОСТ (до 8% гранична допустиме значення викривлення синусоїдальності) необхідна розробка технічних заходів для зниження несинусоїдальності.



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.

$$X_L = X_C$$
$$V_{nn} \cdot \omega \cdot L_p = \frac{1}{V_{nn} \cdot \omega \cdot C_{БК}}$$

За цих умов вибираємо параметри ФКУ:

$$L_p = \frac{1}{V_{nn}^2 \cdot \omega^2 \cdot C_{БК}}$$
$$L_p = \frac{1}{5^2 \cdot (2\pi f)^2 641,9 \cdot 10^{-6}} = 0,00063 \text{ Гн} = 0,63 \text{ мГн}$$
$$C_{БК} = \frac{Q_{БК} \cdot 10^9}{2\pi f \cdot U^2}$$
$$C_{БК} = \frac{8 \cdot 10^{12}}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 6300^2} = 641,9 \text{ мкФ}$$

Приймаємо до установки ФКУ-5-6-10000-УЗ, й реактор типу СРОСЗ-1000/07 УЗ на струм 1900А й індуктивністю 0,7мГн.


Порівняння отриманих показників з діючим на території України ГОСТ 13109-97 та Європейським стандартом EN-50160

Нормування показників електромагнітної сумісності (або показники якості електроенергії (ПЯЕ)) відноситься до числа головних питань проблеми електромагнітної сумісності.

Основним нормативним документом, де сформульовані вимоги до якості електричної енергії в електричних мережах загального призначення, є ГОСТ 13109-97.

Згідно з цим стандартом частина ПЯЕ характеризує електромагнітні завади при сталому режимі роботи електрообладнання енергопостачальної організації і споживачів, зумовлені особливостями технологічного процесу виробництва, передачі, розподілу та споживання електроенергії. До них відносяться відхилення напруги і частоти, викривлення синусоїдальності форми кривої напруги, несиметрія і коливання напруги. Для їх нормування встановлені допустимі значення ПЯЕ.

Інша частина ПЯЕ - короточасні електромагнітні перешкоди, що виникають в результаті комутаційних процесів, грозових і атмосферних явищ і післяаварійних режимів: провали і імпульси напруги,



короткочасні перерви електропостачання. Для них допустимі чисельні значення ГОСТ не встановлює.

Норми якості електроенергії стандартом ГОСТ 13109-97 є рівнями електромагнітної сумісності для кондуктивних електромагнітних завад в системах електропостачання загального призначення. При дотриманні цих норм забезпечується електромагнітна сумісність електричних мереж систем електропостачання загального призначення і електричних мереж споживачів електричної енергії (приймачів електричної енергії).

Дотримання показників якості електроенергії дозволяє економити не тільки паливно-енергетичні ресурси, але також і інші види матеріальних ресурсів, частина яких при зниженому якості електроенергії витрачається на браковану і утилізовану продукцію.

Електроенергія як товар має цілу низку специфічних властивостей. Вона безпосередньо використовується при створенні інших видів продукції і має суттєвий вплив на економічні показники виробництва і якість виробів, що випускаються. Поняття якості електричної енергії відрізняється від поняття якості інших товарів. Якість електроенергії проявляється через якість роботи електроприймачів (ЕП). Тому, якщо ЕП працює незадовільно і в кожному конкретному випадку аналіз якості споживаної електроенергії дає позитивні результати, то винна якість виготовлення ЕП. В цілому ПЯЕ визначають ступінь спотворення напруги електричної мережі за рахунок кондуктивних завад, що вносяться як енергопостачальною організацією, так і споживачами.

Норми, встановлені цим стандартом, підлягають включенню в технічні умови на приєднання споживачів електричної енергії та в договори на користування електричною енергією між енергопостачальними організаціями та споживачами електричної енергії.

При цьому для забезпечення норм ГОСТ 13109-97 в точках загального приєднання допускається в технічних умовах на приєднання споживачів, які є винуватцями погіршення ЯЕ, і в договорах на користування електричною енергією з такими споживачами встановлювати більш жорсткі норми з меншими діапазонами зміни відповідних ПЯЕ, ніж наведені в цьому стандарті.

Відповідно до стандарту ГОСТ 13109-97, систему ПЯЕ при живленні від електричних мереж трифазного струму утворюють: відхилення напруги; розмах зміни напруги; інтенсивність (доза) флікера; коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої лінійної (фазного) напруги; коефіцієнт n-ої гармонійної складової напруги; коефіцієнт несиметрії напруг за зворотною послідовністю і нульової послідовності; тривалість провалу напруги; імпульс напруги; коефіцієнт тимчасової перенапруги; відхилення частоти.

В Україні діє стандарт ГОСТ 13109-97 "Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення". У цьому стандарті в якості допустимих значень ПЯЕ прийняті, в основному, рівні ЕМС в СЕП, наведені в публікаціях Міжнародної електротехнічної комісіїю (МЕК) в якості рекомендацій для складання національних стандартів.

В Європі і, зокрема, в країнах Європейського союзу нормативною базою для оцінки ЕМС електроприймачів промислових підприємств є відомий стандарт:

- Європейський стандарт EN 50160: 2010 р. «Характеристики напруги електрики, що постачається системами розподілу загального призначення»;

Європейським стандартом EN 50160: 2010 «Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks» встановлюються основні характеристики такого продукту, як електроенергія, які повинні враховуватися при складанні договорів між споживачем і постачальником. EN 50160 був прийнятий як національний стандарт усіма країнами Євросоюзу, є членами CENELEC.

Розглянемо дві істотні відмінності міжнародного стандарту EN 50160 від чинного в Україні з 2000 року міждержавного стандарту (для членів СНД) ГОСТ 13109-97:

- в EN 50160 вказано ця конкретна точка, в якій відповідно до договору на підключення споживача, повинні забезпечуватися характеристики напруги електропостачання. Цією точкою є точка приєднання споживача до електричної мережі («supply terminal»);

- в EN 50160 зазначено конкретне значення номінального напруги електропостачання для мереж низької напруги - 230/400 В, яке відноситься до характеристик напруги, а не до показників якості напруги.

Деякі відмінності стандартів ГОСТ 13109-97 і EN 50160 занесені в таблицю 1.

Таблиця 1 - Відмінності стандартів ГОСТ 13109-97 та EN 50160

№	Параметр	Характеристики напруги живлення згідно ГОСТ 13109-97	Характеристики напруги живлення згідно EN 50160
1	Тривалість вимірювання якості електроенергії	24 год (1 доба)	168 год (1 тиждень)
2	Стале відхилення напруги ($\delta U, \%$)	- в точках загального підключення $\pm 10\%$; - для освітлювальних приладів $\pm 2,5\%$; - для АД -5 – +10 %	$\pm 10\%$ протягом 95% часу вимірювання

Продовження табл. 1

№	Параметр	Характеристики напруги живлення згідно ГОСТ 13109-97	Характеристики напруги живлення згідно EN 50160
3	Коливання напруги (розмах зміни напруги ($\delta U_t, \%$); доза флікера ($\delta U_t, \%$); доза флікера ($P_t, \text{в.о.}$))	Визначаються за кривою Меандра в кожному випадку індивідуально	- мережі низької напруги (LV): $\delta U_t = +5\%$; $P_t \leq 1 \text{ в.о.}$ - мережі серетньої напруги (MV): $\delta U_t = +4\%$; $P_t \leq 1 \text{ в.о.}$
4	Несинусоїдальність напруги (коефіцієнт вікривлення синусоїдальності (THD) ($K_U, \%$); коефіцієнт n-ої гармонічної складової ($K_n, \%$))	-в мережах до 1 кВ: $K_U = 8\%$; -в мережах до 10 кВ: $K_U = 8\%$. -найбільша вища гармоніка, яка підлягає нормуванню – це 40-а.	-THD: $K_U < 8\%$; - найбільша вища гармоніка, яка підлягає нормуванню – це 25-а.
5	Несиметрія (коефіцієнт несиметрії по зворотній послідовності ($K_2U, \%$); коефіцієнт за нульовою послідовності ($K_0U, \%$)).	нормальне відхилення – 2%; граничне відхилення – 4%.	До 2% в протягом 95% часу вимірювання, до 3% в деяких випадках.
6	Провали напруги	ГОСТ 13109-97 (Додаток Г)	В діапазоні: $0,01U_n < U_{пр} \leq 0,9 U_n$.
7	Переривання напруги	-кратковременные прерывания до 1 минуты: $0,05U_n \leq U_{пер}$; - длительные прерывания напряжения больше 3 минут	- Short interaptions – переривання напруги до 1 хвилини: $0,01U_n \leq U_{пер}$; - Long interaptions – переривання напруги більше 3 хвилин.
8	Імпульсна перенапруга	ГОСТ 13109-97 (Додаток Д)	- мережі низької напруги (LV) – до 6 кВ; - мережі серетньої напруги – не обмежено.

2.2 Аналіз шкідливого впливу несиметрії та несинусоїдальності напруги на систему електропостачання підприємства

Несиметрія напруги

Несиметрія напруг трифазної мережі характеризується коефіцієнтом зворотної послідовності напруг $K_{2U}, \%$, визначеним ставленням напруги зворотної послідовності U_2 до номінальної напруги:

$$K_{2U} = \frac{U_2}{U_{ном}} \cdot 100\%.$$

Значення K_{2U} в межах до 2% нормально допустимо на затискачах будь-якого трифазного симетричного приймача електроенергії (гранично допустиме значення складає 4%).

Коефіцієнт нульової послідовності напруг, K_{U0} , визначається відношенням нульової послідовності основної частоти до номінального фазній напрузі $U_{ном.ф}, \%$: $K_{U0} = \frac{U_0}{U_{ном.ф}} \cdot 100\%.$


Згідно ГОСТ 13109-97, в розподільних мережах з однофазними освітлювальними і побутовими приймачами електроенергії нормально допустиме значення K_{0U} відповідає 2%, а гранично допустиме значення - 4%.

Несиметрія напруги в електричних мережах підприємств обумовлена наявністю потужних однофазних навантажень (індукційних плавильних і нагрівальних печей, зварювальних агрегатів, печей електрошлакового переплаву), а також трифазних, які тривалий час працюють в несиметричному режимі (наприклад, ДСП). Трифазна система напруг може бути несиметричною при харчуванні мережі підприємства від тягової підстанції змінного струму.

При несиметрії напруг в трифазних мережах з'являються додаткові втрати в елементах електромереж, скорочується термін служби ламп і електроустаткування і знижуються економічні показники його роботи.

При несиметрії напруг в електричних машинах змінного струму виникають магнітні поля, що обертаються не тільки з синхронною швидкістю в напрямку обертання ротора, а й з подвійною синхронною швидкістю в протилежному. В результаті виникає гальмівний електромагнітний момент, а також додатковий нагрів активних частин машини, головним чином ротора, за рахунок струмів подвійної частоти.

В асинхронному двигуні (АД) при коефіцієнтах зворотної послідовності напруг, що зустрічаються в практиці ($K_{2U} \leq 0,05-0,06$), зниження крутного моменту АД виявляється дуже незначним. Вплив несиметрії на втрати в електродвигуні і, отже, нагрівання і скорочення




терміну служби ізоляції його проявляються в більшій мірі. При роботі АД з номінальним крутним моментом і коефіцієнтом зворотній послідовності напруг, рівним 4%, термін служби ізоляції його скорочується приблизно в 2 рази тільки за рахунок додаткового нагрівання. Якщо напруга на одній з фаз буде значно перевищувати номінальне значення, скорочення терміну служби ізоляції буде ще більшим. Для забезпечення нормальних умов роботи електродвигунів в цьому випадку необхідно знижувати розполагаемую потужність, а при проектуванні - збільшувати номінальну потужність електродвигунів, якщо не передбачаються спеціальні заходи щодо симетрування напруг мережі. Ці обставини виникають, наприклад, при проектуванні електрифікованого залізничного транспорту на гірничозбагачувальних і деяких інших промислових підприємствах.

При несиметрії напруг мережі в синхронному двигуні (СД) поряд з виникненням додаткових втрат і нагріванням статора і ротора можуть виникнути небезпечні вібрації в результаті появи знакозмінних моментів, що обертають і тангенціальних сил, пульсуючих з подвійною частотою мережі. При значній несиметрії вібрація може виявитися небезпечною, особливо при недостатній міцності або наявності дефектів зварних з'єднань. Додаткові втрати потужності в СД за несиметричного навантаження викликають появу місцевих (локальних) нагрівів обмотки збудження, що призводить до необхідності знижувати струм збудження і тим самим зменшувати значення реактивної потужності, що видається в мережу. При цьому може виникнути необхідність знизити активне навантаження генератора або момент на валу СД.

При підведенні несиметричних напруг до трансформатора або підключенні несиметричного навантаження виникають струми нульової послідовності, за допомогою яких створюються магнітні потоки, які пронизують залізо трансформатора і додатково розігрівають його, а це в свою чергу погіршує охолодження активної частини. Поганий відведення тепла від активної частини викликає ще більший нагрів ізоляції, аж до того, що при завантаженні трансформатора нижче номінальної потужності він може виявитися перевантаженим. Такий вплив змушує збільшувати встановлену номінальну потужність трансформаторів, що є економічно не вигідним. У трансформаторах з великим значенням опору нульової послідовності при роботі в несиметричному режимі додаткові втрати від магнітних полів нульової послідовності складають близько 30% втрат холостого ходу.

Підключення конденсаторної батареї до мережі, що працює в несиметричному режимі, може викликати ще більшу несиметрію. При такому підключенні кожна фаза батареї завантажуються різним значенням реактивної потужності, що призводить до зміни загальної потужності, втрати при цьому так само розподіляються нерівномірно. У



свою чергу, зниження загальної потужності КБ, в слідстві жорсткого зв'язку з квадратом напруги, веде до ще більшого пофазні зниження напруги, що призводить до ще більш значного спотворення симетрії режиму роботи мережі.

Спотворення симетрії також негативно впливає на роботу багатофазних випрямлячів, так як в випрямлячах протікають різні струми і як результат допустима потужність випрямляча зменшується, так як не всі випрямлячі виявляються завантаженими. Крім того, несиметрія викликає виникнення в випрямленому струмі пульсацій подвоєною частоти. Амплітуда таких пульсацій пропорційна коефіцієнту несиметрії. Ці пульсації резонують у фільтрах і тим самим перевантажують їх і виводять їх з ладу.

Несинусоїдальність напруги

Несинусоїдальність напруги - спотворення синусоїдальної форми кривої напруги. Електроприймачі з нелінійної вольт-амперної характеристикою споживають струм, форма кривої якого відрізняється від синусоїдальної. А протікання такого струму за елементами електричної мережі створює на них падіння напруги, відмінне від синусоїдального, це і є причиною спотворення синусоїдальної форми кривої напруги.

Наприклад, напівпровідникові перетворювачі споживають струм трапецієподібної форми, образно кажучи - вихоплюють з синусоїди шматочки прямокутної форми.

Несинусоїдальність напруги - нормований показник по ГОСТ - 13109-97 (норми якості електричної енергії).


Характеризується такими показниками:

- коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги;
- коефіцієнт n-ої гармонійної складової напруги.

Джерелами несинусоїдальності напруги є: статичні перетворювачі, дугові сталеплавильні та індукційні печі, трансформатори, синхронні двигуни, зварювальні установки, газорозрядними освітлювальні прилади, офісна та побутова техніка.

У двигунах гармоніки напруги призводять до появи додаткових втрат в обмотках ротора, в ланцюгах статора, а також в сталі статора і ротора. Через вихрових струмів і поверхневого ефекту втрати в провідниках статора і ротора більше, ніж визначаються провідникові. Струми витоку, що викликаються гармоніками в торцевих зонах статора і ротора, також призводять до додаткових втрат. Все це призводить до підвищення загальної температури машини і до місцевих перегрівів, найбільш імовірним в роторі, що може привести до серйозних наслідків. Також слід зазначити, що при певних умовах накладення гармонік може виникнути механічна вібрація ротора.

У трансформаторах гармоніки напруги викликають збільшення втрат на гістерезис, втрати, пов'язані з вихровими струмами в стали, і



втрати в обмотках. Крім того, скорочується термін служби ізоляції. Збільшення втрат в обмотках найбільш важливо в разі перетворювального трансформатора, так як наявність фільтра, приєданого зазвичай до сторони змінного струму, не знижує гармонік струму в трансформаторі. Крім того, можуть спостерігатися локальні перегріву трансформаторного бака.

У батареях конденсаторів гармоніки призводять до додатковим втрат енергії. Внаслідок цього відбувається додаткове опалення конденсатора, який може привести до виходу його з ладу. Також можливе пошкодження конденсатора при виникненні гармонійних резонансів в мережі.

Гармоніки можуть порушувати роботу пристроїв захисту або погіршувати їх характеристики. Характер порушення залежить від принципу роботи пристрою. Найбільш поширеними є помилкові спрацьовування, які найбільш вірогідні в роботі систем захисту, заснованих на вимірюванні опорів.

Вплив гармонік на індукційні прилади вимірювання потужності та обліку електроенергії призводить до збільшення похибки результатів їх вимірювань.

2.3 Розробка технічних засобів покращення якості напруги

Симетруючі пристрої.

Несиметрію напруг, обумовлену несиметричними електроприймачами, можна обмежити до значень $K_{2U} \leq 0,02$ як за допомогою схемних рішень, так і шляхом застосування спеціальних симетрувальних пристроїв (СУ).

Симетрування за допомогою СУ зводиться до компенсації еквівалентного струму зворотної послідовності несиметричного навантаження і обумовленого ним напруги. Розрізняють індивідуальний, груповий, централізований і комбінований способи симетрування. Індивідуальні СУ встановлюються безпосередньо у несиметричних електроприймачів. При груповому симетрування в різних точках мережі встановлюється кілька СУ, кожне з яких симетрувальним певну ділянку мережі з підключеною до нього групою несиметричних електроприймачів. При централізованому симетрування в розподільній мережі встановлюється одне СУ. Комбінований спосіб симетрування полягає в поєднанні двох або трьох СУ.

Індивідуальний спосіб дозволяє усунути несиметрію безпосередньо у споживача, але при цьому встановлена потужність силових елементів СУ використовується нераціонально. При централізованому способі потрібна менша встановлена потужність елементів СУ, але в мережі з несиметричними навантаженнями

зберігається несиметрія струмів. Груповий спосіб симетрування поєднує переваги і недоліки індивідуального і централізованого способів. Вибір способу симетрування визначається в основному параметрами мережі і характером навантажень.

Симетруючі пристрої виконуються некерованими або керованими в залежності від особливостей графіка навантаження.

Існуючі СУ можна розділити на дві великі групи: з електричними і електромагнітними зв'язками. У СУ з електричними зв'язками симетрувальні елементи і навантаження включаються або за схемою трикутника, або трипроменевою зірки. По конструкції СУ поділяють на одно-, дво- і трьохелементні схеми.

На рис. 7 приведена схема одноелементна СУ з індуктивним L_{AB} або ємнісним C_{AB} , (в залежності від характеру навантаження) симетрувальним елементом і компенсує ємністю C_K . При великому коефіцієнті потужності симетрованої мережі воно має низький ККД, виявляється мало придатним для симетрування.

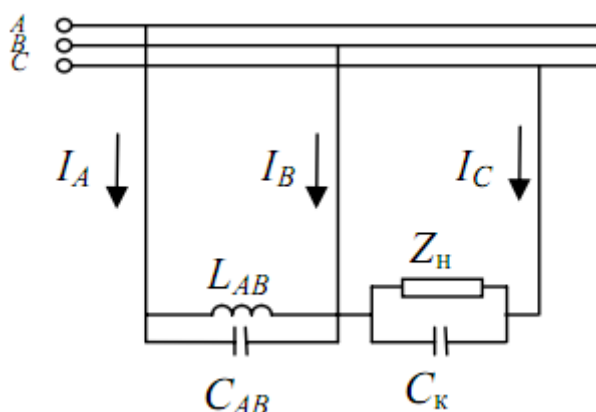


Рисунок 7 – Схема одноелементного СУ

З двохелементних СУ найширше розповсюджена схема Штейнметця, представлена на рисунку 8.

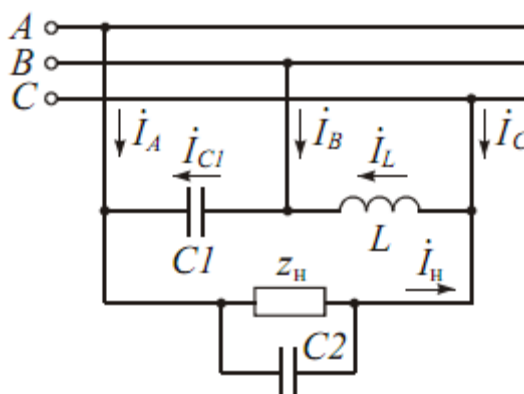


Рисунок 8 – Схема Штейнментця

Симетруючий пристрій Штейнметца найбільш ефективний при коефіцієнті потужності навантаження, що дорівнює одиниці. Тому при активно-індуктивному навантаженні паралельно їй включається батарея конденсаторів C_2 .

Симетрування при незмінних значеннях симетрувальних елементів забезпечується тільки при одному значенні потужності навантаження. Для обґрунтування можливості застосування некерованих СУ в мережах зі змінним навантаженням необхідно проведення статистичних досліджень параметрів несиметрії.

Керовані СУ можуть мати як безперервне (аналогове), так і поетапне (дискретне) управління.

Конденсаторні батареї дискретних СУ набираються з декількох груп, одна з яких підключена постійно, а інші - змінно. Перемикання здійснюються за допомогою тиристорних ключів. В даний час знаходить застосування плавне регулювання ємнісних елементів шляхом підключення паралельно до конденсаторів реакторів, керованих тиристорами.

Трьохелементні СУ є найбільш універсальними і гнучкими; до їх недоліків можна віднести досить низький коефіцієнт використання (рис. 9).

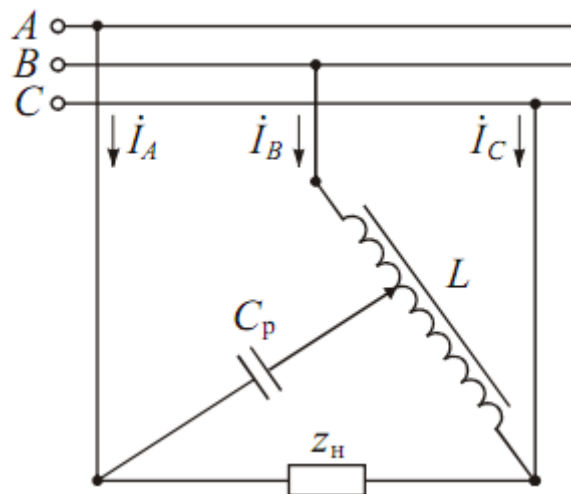


Рисунок 9 – Схема трьохелементного СУ

Для симетрування системи лінійних напруг при одно-, дво- і трифазних несиметричних навантаженнях широко застосовуються батареї конденсаторів з неоднаковими потужностями фаз, які використовуються для компенсації реактивної потужності в мережі (рис. 10).

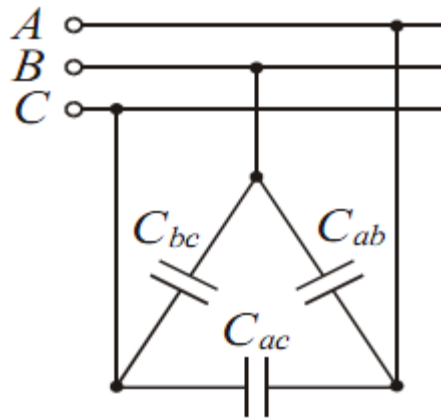


Рисунок 10 – Схема симетрування с використанням батарей конденсаторів

Симетрувальний пристрій з електромагнітними зв'язками ділиться на дві групи: з дільниками (автотрансформаторні) і трансформаторні. У схемах з дільниками потужність СУ зазвичай вибирається рівної потужності навантаження. За допомогою перемикав автотрансформаторної відпайки можна симетрувати нелінійне навантаження зі змінним коефіцієнтом потужності. На рис. 11 представлена схема з одним C_p - регульованим елементом. Така схема має значення $\cos\varphi \leq 0,7$.

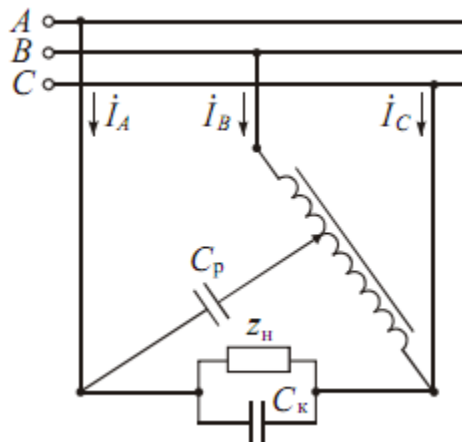


Рисунок 11 – Автотрансформаторна схема с регульованим елементом C_p

Симетруючі пристрої трансформаторного типу дуже різноманітні. На рис. 12 наведена схема живлення двофазного навантаження від трансформатора Скотта. Співвідношення витків трансформаторів вибираються таким чином, щоб вторинні напруги їх були рівні. Симетруючі пристрої трансформаторного типу є індивідуальними і нерегульованими.

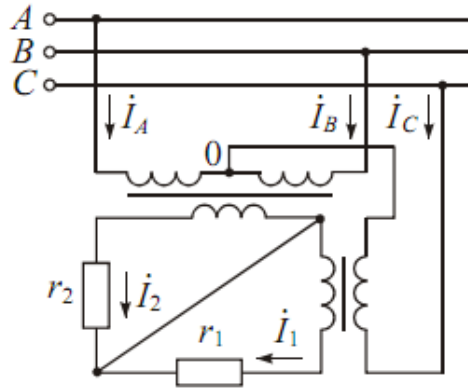


Рисунок 12 – Схема живлення двохфазного навантаження від трансформатора Скотта

Симетрування системи напруг може бути здійснено також шляхом введення системи додаткових ЕРС: між джерелом і приймачем в розрив лінійних проводів включаються додаткові джерела ЕРС, що утворюють систему зворотній послідовності. В результаті підсумовування ЕРС основного і додаткового джерел їх симетричні складові зворотній послідовності компенсуються, напруга на приймачі стає симетричним. Як джерело додаткової системи ЕРС можуть бути використані синхронний генератор, трансформатори послідовного регулювання, трансформатор з пофазним регулювання коефіцієнта трансформації.

Знаходять застосування також фільтросиметруючі пристрої (ФСП) представляють собою фільтри вищих гармонік, зібрані на базі батарей конденсаторів симетруючого пристрою, - так звані несиметричні фільтри (рис. 13). Вибір лінійних напруг, на які включається фільтруючі кола ФСП, і співвідношення потужностей батарей конденсаторів, що включаються в фази фільтра, проводиться за умовами симетрування.

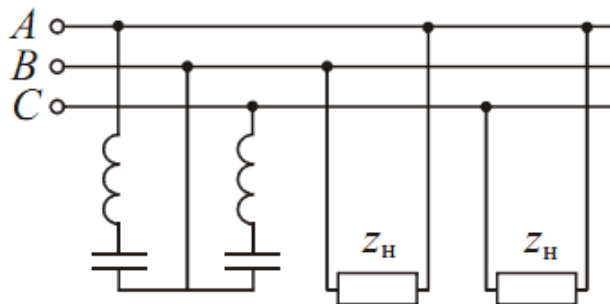


Рисунок 13 – Схема несиметричного фільтра

В даному індивідуальному завданні може бути застосована схема симетрування за допомогою конденсаторів зібраних в зірку підключеними ємностями між фаз BC і AB (додаток Б, рис.1).

Фільтро-компенсуючі пристрої

Зниження рівнів ВГ в електромережах є частиною загального завдання зменшення впливу нелінійних навантажень на мережу

живлення і поліпшення якості електроенергії в СЕП підприємств. Комплексне вирішення цього завдання, засноване на застосуванні багатофункціональних пристроїв, виявляється в економічному відношенні більш доцільним, ніж, наприклад, використання заходів щодо поліпшення форми струму мережі перетворювача. Прикладом таких багатофункціональних пристроїв є резонансні фільтри, інакше називаються фільтрокомпенсуючі пристрої (ФКП), які поряд зі зниженням рівнів ВГ генерують в мережу живлення реактивну потужність.

При паралельному з'єднанні LC-ланцюгів, налаштованих на частоти окремих гармонік, реалізується ланцюгове ФКП. Дефіцит реактивної потужності на шинах підстанції в цьому випадку може бути повністю покритий за допомогою батарей конденсаторів ФКП, причому встановлена потужність конденсаторів використовується на 80 - 90%. Таким чином, ФКУ є найбільш простими й економічними фільтрами, що забезпечило їх широке застосування.

Спрощені схеми ФКУ показані на рис.14. У схемі, наведеній на рис.14, а ізоляція конденсаторів щодо землі знаходиться під напругою, що не перевищує фазну напругу мережі: таким чином, підвищується надійність використання батареї. За умовами зручності і надійності компонування електрообладнання найбільшого поширення набула схема, наведена на рис.14, б. Схема, наведена на рис.14, в дозволяє з тієї ж ємністю отримати в 3 рази більше реактивної потужності, але конденсатори виявляються під великим значенням напруги.

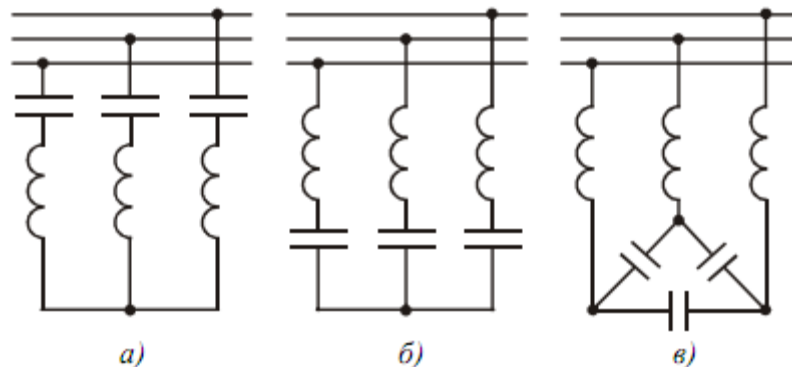


Рисунок 14 – Схеми ФКП

В даному завданні фільтрокомпенсуючі пристрої встановлюються, так як коефіцієнт викривлення синусоїдальності перевищує гранично допустиму похибку $K_{УК1} = 11\%$. Схеми ФКУ наведені в Додатку Б, рис.2.

2.4 Розрахунок додаткових втрат активної потужності

При наявності електромагнітних завад виникають додаткові втрати активної потужності в елементах електрообладнання.

Діюче значення вищих гармонік:

$$U_n = \frac{m}{6} \cdot \frac{\lambda_n}{\sqrt{2}} \cdot \Delta U_1,$$

де ΔU_1 – глибина комутаційного викривлення, кВ;

n – номер гармоніки;

m – фазність випрямлення;

λ – коефіцієнт вищих гармонік, які визначаються по розрахунковим номограмам з урахуванням кута комутації випрямляча;

Кут комутації випрямляча:

$$\gamma = \frac{6 \cdot (X_{*c} + X_{*np})}{m \cdot \sin \varphi} = \frac{6 \cdot (0,067 + 0,0875)}{6 \cdot 0,6} = 0,2545 = 14,5^\circ.$$

За допомогою номограми (рис. 15) для визначення окремих гармонік напруги, знаходимо коефіцієнт вищих гармонік (для $\gamma = 14,5^\circ$ $\lambda_5 = 0,225$; $\lambda_7 = 0,213$; $\lambda_{11} = 0,17$; $\lambda_{13} = 0,15$).

Глибина комутації викривлень:

$$\Delta U_1 = \frac{X_{*c}}{X_{*c} + X_{*np}} \cdot \sqrt{2} \cdot U_n \cdot \sin \varphi = \frac{0,067}{0,067 + 0,0875} \cdot \sqrt{2} \cdot 6 \cdot 0,6 = 2,2 \text{ кВ}.$$

Діюче значення n -ої гармоніки:

$$U_5 = \frac{6}{6} \cdot \frac{0,225}{\sqrt{2}} \cdot 2,2 = 0,35 \text{ кВ};$$

$$U_7 = \frac{6}{6} \cdot \frac{0,213}{\sqrt{2}} \cdot 2,2 = 0,331 \text{ кВ};$$

$$U_{11} = \frac{6}{6} \cdot \frac{0,17}{\sqrt{2}} \cdot 2,2 = 0,264 \text{ кВ};$$

$$U_{13} = \frac{6}{6} \cdot \frac{0,15}{\sqrt{2}} \cdot 2,2 = 0,23 \text{ кВ}.$$

Діюче значення n -ої гармоніки в відсотках:

$$U_{n\%} = \frac{U_n}{U_n} \cdot 100\%,$$

де U_n – номінальна напруга, кВ;

$$U_5 = \frac{0,35}{6} \cdot 100 = 5,8\%;$$

$$U_7 = \frac{0,331}{6} \cdot 100 = 5,51\%;$$

$$U_{11} = \frac{0,261}{6} \cdot 100 = 4,35\%;$$

$$U_{13} = \frac{0,23}{6} \cdot 100 = 3,8\%.$$

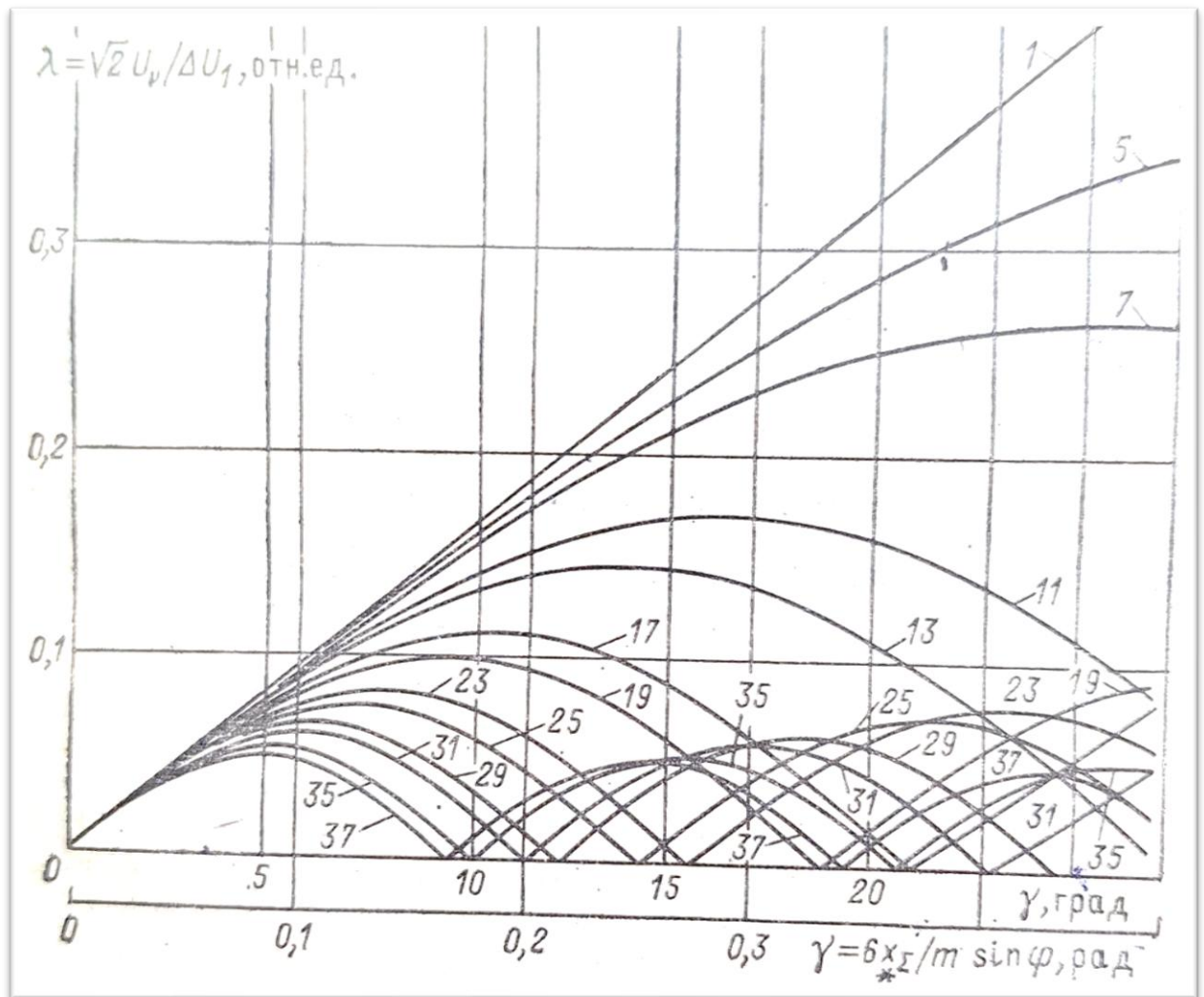


Рисунок 15 – Номограма для визначення окремих гармонік напруги

Додаткові втрати активної потужності в електрообладнанні підприємства від **несинусоїдальності**:

$$\Delta P_n = \Delta P_{ном} \cdot \rho \cdot \sum_{n=11}^n \Lambda_n \cdot U_n^2,$$

де $\Lambda_n = \frac{1}{n\sqrt{n}}$ коефіцієнт гармонійних втрат, значення якого залежить

від номера гармоніки;

ρ – індекс втрат;

$$\Lambda_5 = \frac{1}{5\sqrt{5}} = 0,089;$$

$$\Lambda_7 = \frac{1}{7\sqrt{7}} = 0,053;$$

$$\Lambda_{11} = \frac{1}{11\sqrt{11}} = 0,027;$$

$$\Lambda_{13} = \frac{1}{13\sqrt{13}} = 0,021;$$

Визначаємо дефіцит реактивної потужності на шинах 6 кВ:

$$\begin{aligned}Q_{\text{пр}} &= S_{\text{пр}} \cdot \sin \varphi_{\text{пр}} \\Q_{\text{пр}} &= 12 \cdot 0,6 = 7,2 \text{ Мвар} \\Q_{\text{АД}} &= S_{\text{АД}} \cdot \sin \varphi_{\text{АД}} = \frac{S_{\text{АД}} \cdot \sin \varphi_{\text{АД}}}{\cos \varphi_{\text{АД}}} \\Q_{\text{АД}} &= \frac{1,88 \cdot 0,52}{0,85} = 1,15 \text{ Мвар} \\Q_o &= Q_{\text{пр}} + Q_{\text{АД}} \\Q_o &= 7,2 + 1,15 = 8,35 \text{ Мвар} \\\Delta p &= \frac{Q_o}{S_{\text{КЗ}}} \\\Delta p &= \frac{8,35}{1200} = 0,0069 \text{ МВт} = 6,9 \text{ кВт}\end{aligned}$$

В силовому трансформаторі (приймаємо трансформатор ТДН-16000/110):

$$\rho_{\text{тр}}^{\text{ВГ}} = \frac{0,6}{U_{\text{к}}^2},$$

де $U_{\text{к}}$ – напруга короткого замикання, %;

$$\rho_{\text{тр}}^{\text{ВГ}} = \frac{0,6}{(10,5/100)^2} = 54,42.$$

Втрати потужності в трансформаторі при:

- нормальному режимі роботи на частоті основної гармоніки:

$$\Delta P_{\text{ном.тр}} = \Delta P_{\text{КЗ}} \cdot K_3^2,$$

де $\Delta P_{\text{КЗ}}$ – втрати активної потужності випробування короткого замикання між обмотками, кВт;

K_3 – коефіцієнт завантаження (приймаємо 0,8);

$$\Delta P_{\text{ном.тр}} = 85 \cdot 0,8^2 = 54 \text{ кВт};$$

- впливі вищих гармонік:

$$\begin{aligned}\Delta P_{\text{ВГ.тр}} &= 54 \cdot 54,42 \cdot (0,089 \cdot 0,058^2 + 0,053 \cdot 0,0551^2 + \\&+ 0,027 \cdot 0,0435^2 + 0,021 \cdot 0,038^2) = 1,59 \text{ кВт}.\end{aligned}$$

В цеховому трансформаторі (приймаємо трансформатор ТСЗ-1000/6):

$$\rho_{\text{тр.ц}}^{ВГ} = \frac{0,6}{(8/100)^2} = 93,75.$$

Втрати потужності в трансформаторі при:

- нормальному режимі роботи на частоті основної гармоніки:

$$\Delta P_{\text{ном.тр}} = 10 \cdot 0,7^2 = 4,9 \text{ кВт.}$$

- впливі вищих гармонік:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{ВГ.тр.ц}} &= 4,9 \cdot 93,75 \cdot (0,089 \cdot 0,058^2 + 0,053 \cdot 0,0551^2 + \\ &+ 0,027 \cdot 0,0435^2 + 0,021 \cdot 0,038^2) = 0,248 \text{ кВт.} \end{aligned}$$

В асинхронному двигуні (приймаємо ДАЗО4-560Х-6):

$$\rho_{\text{АД}}^{ВГ} = K_n^2,$$

де K_n – кратність пускового струму;

$$\rho_{\text{АД}}^{ВГ} = 6,5^2 = 42,25.$$

Втрати потужності в асинхронному двигуні при:

- нормальному режимі роботи на частоті основної гармоніки:

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

де $\eta_{\text{ном}}$ – коефіцієнт корисної дії;

$$\Delta P_{\text{ном}} = 1000 \cdot \frac{1 - 0,96}{0,96} = 41,6 \text{ кВт.}$$

- впливі вищих гармонік:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{ВГ.тр.ц}} &= 41,6 \cdot 42,25 \cdot (0,089 \cdot 0,058^2 + 0,053 \cdot 0,0551^2 + \\ &+ 0,027 \cdot 0,0435^2 + 0,021 \cdot 0,038^2) = 0,95 \text{ кВт.} \end{aligned}$$

Додаткові втрати активної потужності в електрообладнанні підприємства від **несиметрії**:

$$\Delta P_{\text{нс}} = \Delta P_{\text{ном}} \cdot \rho_{\text{нс}} \cdot K_{2U}^2,$$

де K_{2U} – коефіцієнт несиметрії, в.о.

В силовому трансформаторі:

$$\rho_{mp}^{nc} = \frac{1}{U_k^2} = \frac{1}{(10,5/100)^2} = 90.$$
$$\Delta P_{nc} = 54 \cdot 90 \cdot 0,042^2 = 8,57 \text{ кВт.}$$

В цеховому трансформаторі:

$$\rho_{mp.ц}^{nc} = \frac{1}{(8/100)^2} = 156,2.$$
$$\Delta P_{nc} = 4,9 \cdot 156,2 \cdot 0,042^2 = 1,35 \text{ кВт.}$$

В асинхронному двигуні:

$$\rho_{AD}^{nc} = 2,41 \cdot K_n = 2,41 \cdot 6,5 = 15,67.$$
$$\Delta P_{nc} = 41,6 \cdot 15,67 \cdot 0,042^2 = 1,14 \text{ кВт.}$$

Сумарні втрати кабельних ліній (КЛ) в несиметричному і несинусоїдальному режимі:

$$\Delta P_{КЛ} = (3I_1^2 + 3I_2^2 + 1,41 \sum \sqrt{n} \cdot I_n^2) \cdot R,$$

де I_1 – струм прямої послідовності, кА;
 I_2 – струм зворотної послідовності, кА;
 R – опір КЛ, Ом;

Струм прямої послідовності:

$$I_1 = I_{доп} \cdot \frac{70}{100},$$

де $I_{доп}$ – допустимий тривалий струм, А;

$$I_1 = 275 \cdot \frac{70}{100} = 192,5 \text{ А.}$$

Струм n-ой гармоніки:

$$I_n = \frac{S_{пр}}{n \cdot \sqrt{3} \cdot U_n},$$

де $S_{пр}$ – потужність перетворювача, МВА;

$$I_5 = \frac{12}{5 \cdot \sqrt{3} \cdot 6} = 0,23 \text{ кА.}$$

$$I_7 = \frac{12}{7 \cdot \sqrt{3} \cdot 6} = 0,16 \text{ кА.}$$

$$I_{11} = \frac{12}{11 \cdot \sqrt{3} \cdot 6} = 0,104 \text{ кА.}$$

$$I_{13} = \frac{12}{13 \cdot \sqrt{3} \cdot 6} = 0,088 \text{ кА.}$$

Опір КЛ:

$$R = r_0 \cdot L_{\text{КЛ}},$$

де r_0 – погонний активний опір, Ом/км;

$L_{\text{КЛ}}$ – довжина кабельної лінії, км;

$$R = 0,265 \cdot 2,2 = 0,583 \text{ Ом.}$$

$$\Delta P_{\text{КЛ}} = (3 \cdot 192,5^2 + 3 \cdot 502,96^2 + 1,41 \cdot (\sqrt{5} \cdot 230^2 + \sqrt{7} \cdot 160^2 + \sqrt{11} \cdot 104^2 + \sqrt{13} \cdot 88^2)) \cdot 0,583 = 235496 \text{ Вт}$$

Втрати активної потужності в КЛ при протіканні симетричних синусоїдальних струмів:

$$\Delta P_{\text{КЛ.св}} = 3I_1^2 \cdot R = 3 \cdot 192,5^2 \cdot 0,583 = 64811 \text{ Вт.}$$

Додаткові втрати:

$$\Delta P_{\text{дон.КЛ}} = 235496 - 64811 = 170685 \text{ Вт.}$$

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

$$\sigma_7 = \frac{1}{\frac{1}{\Delta p^{5^2}} \left[1 - \left(\frac{5}{7} \right)^2 \right] + 1} = 0,51, \text{ де}$$

$$\Delta p = \frac{Q_0}{\frac{S_K}{K_T}} = \frac{8,35}{\frac{1200}{3,2}} = 0,021 \text{ Мвар}$$

Визначаємо залишкове значення вищих гармонік після установки ФКУ:

$$U_5^* = 0\%$$

$$U_7^* = U_7 \cdot (1 - \sigma_7)$$

$$U_7^* = 5,51 \cdot (1 - 0,51) = 2,7 \%$$

Значення коефіцієнта викривлення після установки ФКУ:

$$K_U^* = \sqrt{(U_5^*)^2 + (U_7^*)^2} = \sqrt{0^2 + 2,7^2} = 2,7\%.$$

2.5 Розрахунок річних збитків від неякісної електроенергії

Коефіцієнт гармонічних втрат:

$$\Lambda_n = \sum_{n=11}^{25} \left(\frac{U_{n^*}^2}{n\sqrt{n}} \right) = \frac{0,058^2}{5\sqrt{5}} + \frac{0,0551^2}{7\sqrt{7}} + \frac{0,0435^2}{11\sqrt{11}} + \frac{0,038^2}{13\sqrt{13}} = 0,001702.$$

Коефіцієнт перерахунку вартості втрат електроенергії:

$$K_\beta = \frac{\beta}{0,01} = \frac{1,5}{0,01} = 150.$$

Щорічний збиток від несинусоїдальності напруги в кожному елементі СЕП:

-трансформатори ГЗП:

$$Y_1 = (K_\beta \cdot 510 \cdot T \cdot \Delta P_{КЗ} + 7,3 \cdot K) \cdot \Lambda_n,$$

де Т – число годин роботи на рік (8000);

К – вартість трансформатора;

$$Y_1 = 2 \cdot (150 \cdot 510 \cdot 8 \cdot 85 + 7,3 \cdot 1500000) \cdot 0,001702 = 214349,88 \text{ грн/рік.}$$

- цеховий трансформатор:

$$\begin{aligned} Y_2 &= (K_\beta \cdot 610 \cdot T \cdot \Delta P_{КЗ} + 1,2 \cdot K) \cdot \Lambda_n = \\ &= 3(150 \cdot 610 \cdot 8 \cdot 10 + 1,2 \cdot 760000) \cdot 0,001702 = 42032,5 \text{ грн/рік.} \end{aligned}$$

- асинхронні двигуни:

$$\begin{aligned} Y_3 &= (K_\beta \cdot 250 \cdot T \cdot \Delta P_{ном} + 1,2 \cdot K) \cdot \Lambda_n = \\ &= 2(150 \cdot 250 \cdot 6,5 \cdot 41,6 + 1,2 \cdot 160000) \cdot 0,001702 = 35170,1 \text{ грн/рік.} \end{aligned}$$

- кабельні лінії:

$$\begin{aligned} Y_4 &= 0,1 \cdot L_{кЛ} \cdot K \cdot \sum_{n=11}^{25} n \cdot U_{n^*}^2 = 0,1 \cdot 2200 \cdot 595 \cdot (5 \cdot 0,058^2 + \\ &+ 7 \cdot 0,0551^2 + 11 \cdot 0,0435^2 + 13 \cdot 0,038^2) = 10165,5 \text{ грн/рік.} \end{aligned}$$

Щорічний сумарний збиток:

$$\begin{aligned} Y_\Sigma &= Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 = \\ &= 214349,8 + 42032,5 + 35170,1 + 10165,5 = 301717,3 \text{ грн/рік.} \end{aligned}$$



2.6 Зміст індивідуального завдання №1

1.1. Аналіз системи електропостачання підприємства та приймачів, які вносять електромагнітні завади в електричну мережу.

1.2. Складання схеми заміщення та визначення показників якості напруги по несиметрії та несинусоїдальності.

1.3. Порівняння отриманих показників з діючим на території України ДСТУ EN50160.

1.4. Аналіз шкідливого впливу несиметрії та несинусоїдальності напруги на систему електропостачання підприємства.

2.7 Зміст індивідуального завдання №2

2.1. Розробка технічних засобів покращення якості напруги. Вибір параметрів симетруючих та фільтро-компенсуючих улаштувань (ФКУ).

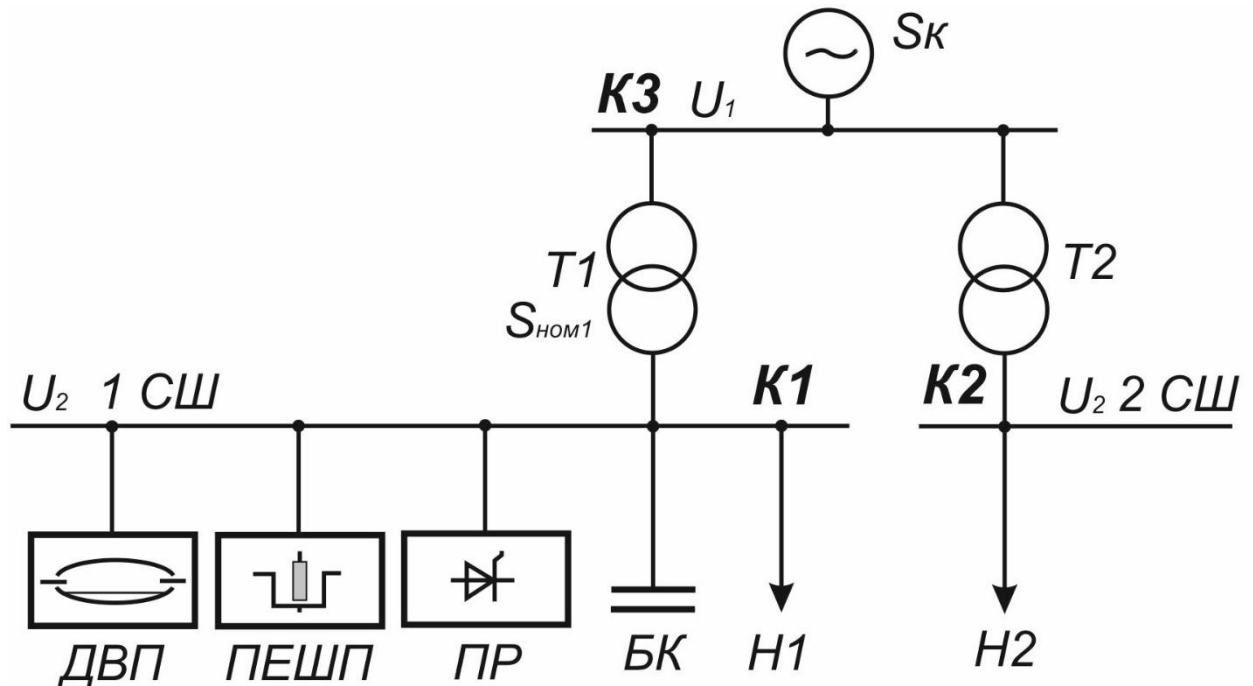
2.2. Розрахунок додаткових втрат активної потужності в електрообладнанні підприємства до та після встановлення пристроїв покращення якості напруги. Порівняння результатів.

2.3. Розрахунок річних збитків у системі електрозабезпечення від неякісної напруги наближеним методом експертних оцінок.

3 ВАРІАНТИ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ЗАВДАННЯ

ВАРІАНТ №1

Спрощена схема електропостачання промислового підприємства



1. Вихідні дані про систему електропостачання

1.	Потужність КЗ на стороні ВН S_k , МВА	1000
2.	Напруга сторони ВН підстанції U_1 , кВ	110
3.	Напруга сторони НН підстанції U_2 , кВ	10
4.	Потужність БК на 1СШ $Q_{БК}$, Мвар	6
5.	Потужність трансформаторів ГПП $S_{ном1}$, МВА	2×25
6.	Потужність цехових трансформаторів КТП $S_{ном2}$, МВА	6×0,63
7.	Потужність високовольтних асинхронних двигунів $S_{номад}$, МВт	2×0,8
8.	Тип та перетин кабелів у розподільчій мережі підприємства Довжина КЛ $L_{кл}$, км	СБН 3×95 2,5
9.	Навантаження $H1$: Повна потужність навантаження S_{H1} , МВА Відносна провідність зворотної послідовності y^*_{3} Коефіцієнт потужності $\cos\varphi_3$	6 5 0,78
10.	Навантаження $H2$: Повна потужність навантаження S_{H2} , МВА Відносний повний опір зворотної послідовності \dot{z}_2	10 0,4+j0,7

2. Вихідні дані про несиметричне навантаження

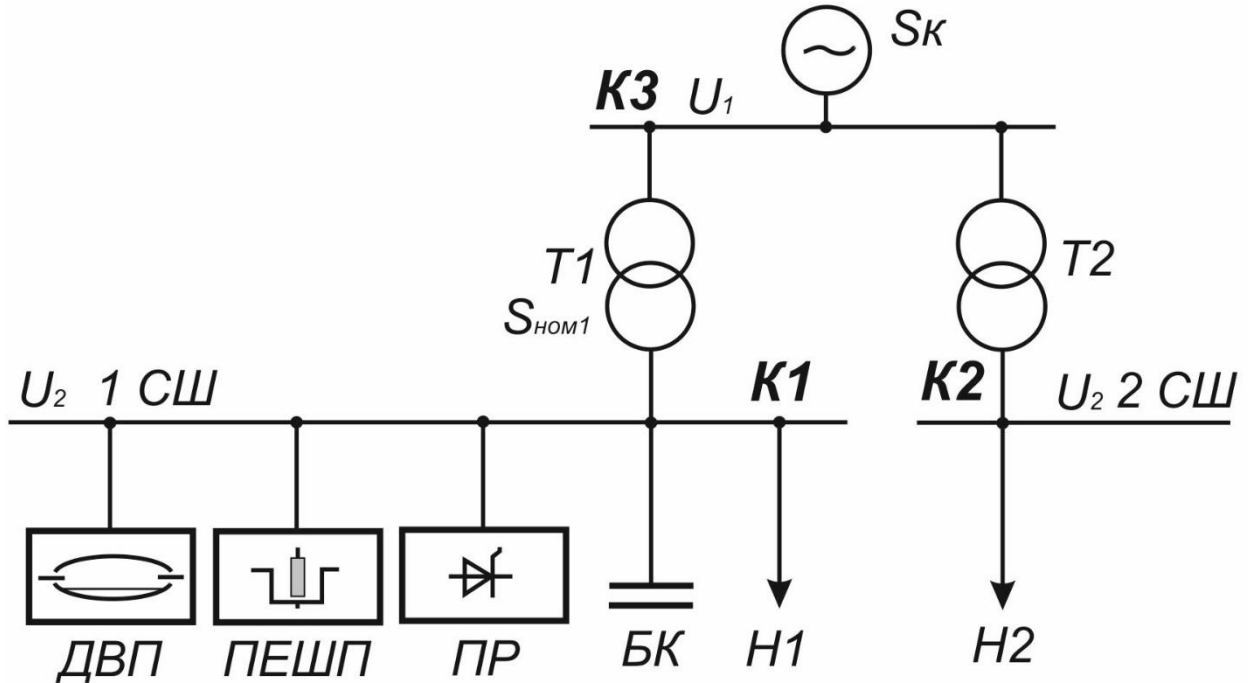
1.	Дугова вакуумна піч ДВП : Повна потужність навантаження $S_{двп}$, МВА Відносна провідність зворотної послідовності y^{*1} Коефіцієнт потужності $\cos\varphi_1$	8 0,52 0,7
2.	Піч електрошлакового переплаву ПЕШП : Повна потужність навантаження $S_{пешп}$, МВА Відносна провідність зворотної послідовності y^{*2} Коефіцієнт потужності $\cos\varphi_2$ Відносне значення струму зворотної послідовності I^{*2}	5 1 0,7 1,5

3. Вихідні дані про нелінійне навантаження

1.	Потужність перетворювача $S_{пр}$, МВА	10
2.	Номінальна потужність трансформатора перетворювача $S_{ном T}$, МВА	16
3.	Фазність перетворювача	6
4.	Коефіцієнт потужності $\cos\varphi_{пр}$	0,8

ВАРІАНТ №2

Спрощена схема електропостачання промислового підприємства



1. Вихідні дані про систему електропостачання

1.	Потужність КЗ на стороні ВН S_k , МВА	2000
2.	Напруга сторони ВН підстанції U_1 , кВ	150
3.	Напруга сторони НН підстанції U_2 , кВ	6
4.	Потужність БК на 1СШ $Q_{БК}$, Мвар	7
5.	Потужність трансформаторів ГПП $S_{ном1}$, МВА	2×32
6.	Потужність цехових трансформаторів КТП $S_{ном2}$, МВА	6×1,6
7.	Потужність високовольтних асинхронних двигунів $S_{номAD}$, МВт	5×1,0
8.	Тип та перетин кабелів у розподільчій мережі підприємства Довжина КЛ $L_{кл}$, км	СБН 3×120 2,5
9.	Навантаження H1 : Повна потужність навантаження S_{H1} , МВА Відносна провідність зворотної послідовності y^*_3 Коефіцієнт потужності $\cos\varphi_3$	10 6 0,78
10.	Навантаження H2 : Повна потужність навантаження S_{H2} , МВА Відносний повний опір зворотної послідовності \dot{z}_2	20 0,7+j0,9

2. Вихідні дані про несиметричне навантаження

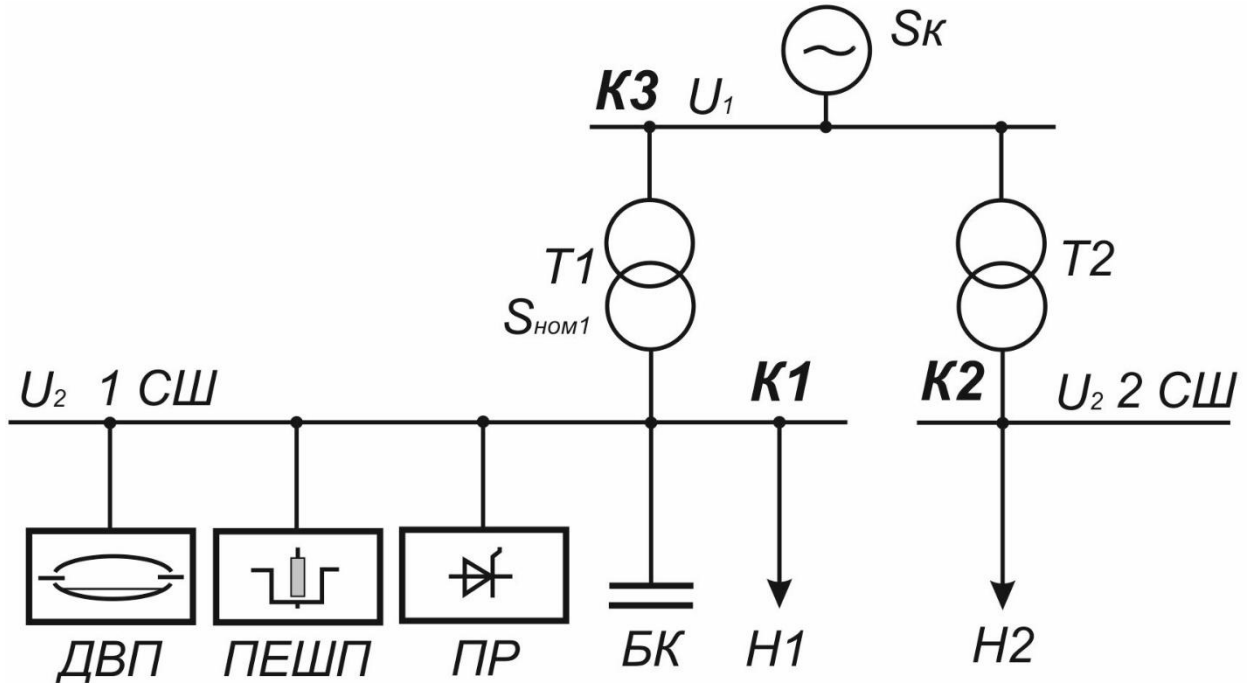
1.	Дугова вакуумна піч ДВП : Повна потужність навантаження $S_{двп}$, МВА Відносна провідність зворотної послідовності y^{*1} Коефіцієнт потужності $\cos\varphi_1$	12 0,52 0,7
2.	Піч електрошлакового переплаву ПЕШП : Повна потужність навантаження $S_{пешп}$, МВА Відносна провідність зворотної послідовності y^{*2} Коефіцієнт потужності $\cos\varphi_2$ Відносне значення струму зворотної послідовності I^{*2}	7 1 0,7 1,65

3. Вихідні дані про нелінійне навантаження

1.	Потужність перетворювача $S_{пр}$, МВА	10
2.	Номінальна потужність трансформатора перетворювача $S_{ном T}$, МВА	16
3.	Фазність перетворювача	12
4.	Коефіцієнт потужності $\cos\varphi_{пр}$	0,8

ВАРІАНТ №3

Спрощена схема електропостачання промислового підприємства



1. Вихідні дані про систему електропостачання

1.	Потужність КЗ на стороні ВН S_k , МВА	1700
2.	Напруга сторони ВН підстанції U_1 , кВ	110
3.	Напруга сторони НН підстанції U_2 , кВ	6
4.	Потужність БК на 1СШ $Q_{БК}$, Мвар	7
5.	Потужність трансформаторів ГПП $S_{ном1}$, МВА	2×16
6.	Потужність цехових трансформаторів КТП $S_{ном2}$, МВА	3×1,0
7.	Потужність високовольтних асинхронних двигунів $S_{номаД}$, МВт	5×0,3
8.	Тип та перетин кабелів у розподільчій мережі підприємства Довжина КЛ $L_{кл}$, км	СБН 3×95 1,8
9.	Навантаження H1 : Повна потужність навантаження S_{H1} , МВА Відносна провідність зворотної послідовності y^*_{Σ} Коефіцієнт потужності $\cos\varphi_{\Sigma}$	4 6 0,8
10.	Навантаження H2 : Повна потужність навантаження S_{H2} , МВА Відносний повний опір зворотної послідовності \dot{z}_2	7 0,5+j0,56

2. Вихідні дані про несиметричне навантаження

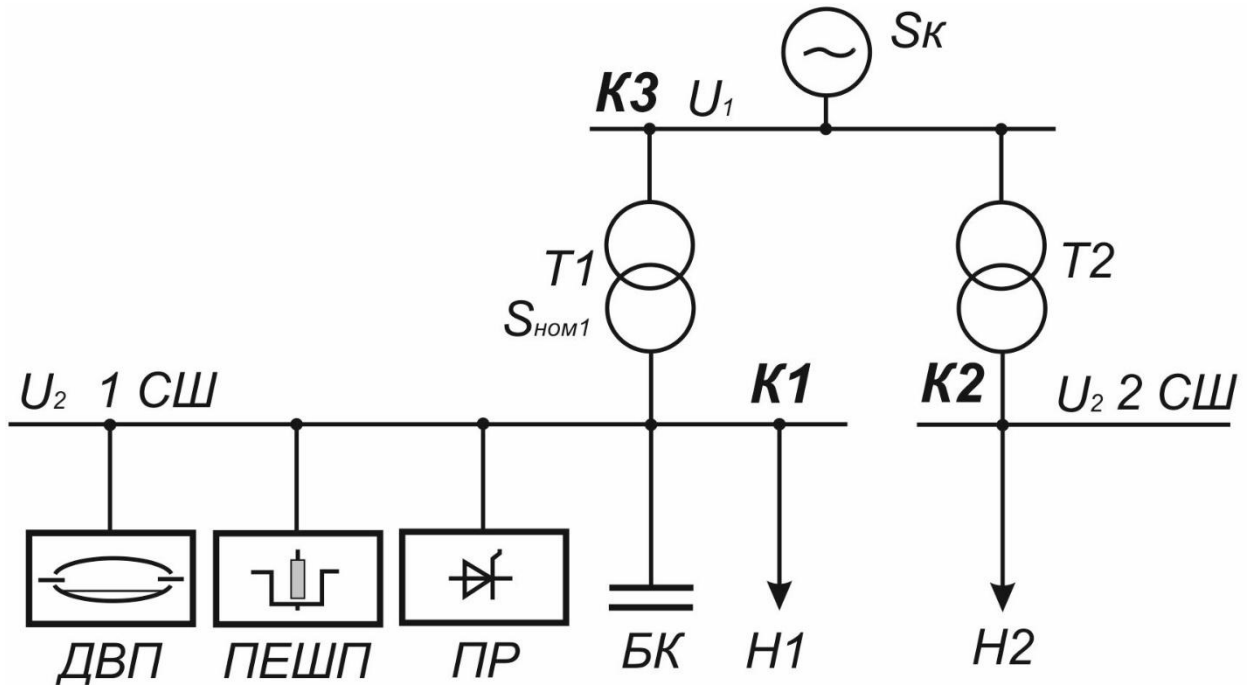
1.	Дугова вакуумна піч ДВП : Повна потужність навантаження $S_{двп}$, МВА Відносна провідність зворотної послідовності y^{*1} Коефіцієнт потужності $\cos\varphi_1$	4 0,52 0,7
2.	Піч електрошлакового переплаву ПЕШП : Повна потужність навантаження $S_{пешп}$, МВА Відносна провідність зворотної послідовності y^{*2} Коефіцієнт потужності $\cos\varphi_2$ Відносне значення струму зворотної послідовності I^{*2}	6 1 0,7 1,65

3. Вихідні дані про нелінійне навантаження

1.	Потужність перетворювача $S_{пр}$, МВА	2
2.	Номінальна потужність трансформатора перетворювача $S_{ном T}$, МВА	2,5
3.	Фазність перетворювача	6
4.	Коефіцієнт потужності $\cos\varphi_{пр}$	0,8

ВАРІАНТ №4

Спрощена схема електропостачання промислового підприємства



1. Вихідні дані про систему електропостачання

1.	Потужність КЗ на стороні ВН S_k , МВА	2000
2.	Напруга сторони ВН підстанції U_1 , кВ	110
3.	Напруга сторони НН підстанції U_2 , кВ	10
4.	Потужність БК на 1СШ $Q_{БК}$, Мвар	8
5.	Потужність трансформаторів ГПП $S_{ном1}$, МВА	2×40
6.	Потужність цехових трансформаторів КТП $S_{ном2}$, МВА	6×1,0
7.	Потужність високовольтних асинхронних двигунів $S_{номAD}$, МВт	5×0,8
8.	Тип та перетин кабелів у розподільчій мережі підприємства Довжина КЛ $L_{кл}$, км	СБН 3×95 4,8
9.	Навантаження H1 : Повна потужність навантаження S_{H1} , МВА Відносна провідність зворотної послідовності y^*_3 Коефіцієнт потужності $\cos\varphi_3$	10 5 0,8
10.	Навантаження H2 : Повна потужність навантаження S_{H2} , МВА Відносний повний опір зворотної послідовності \dot{z}_2	23 0,5+j0,56

2. Вихідні дані про несиметричне навантаження

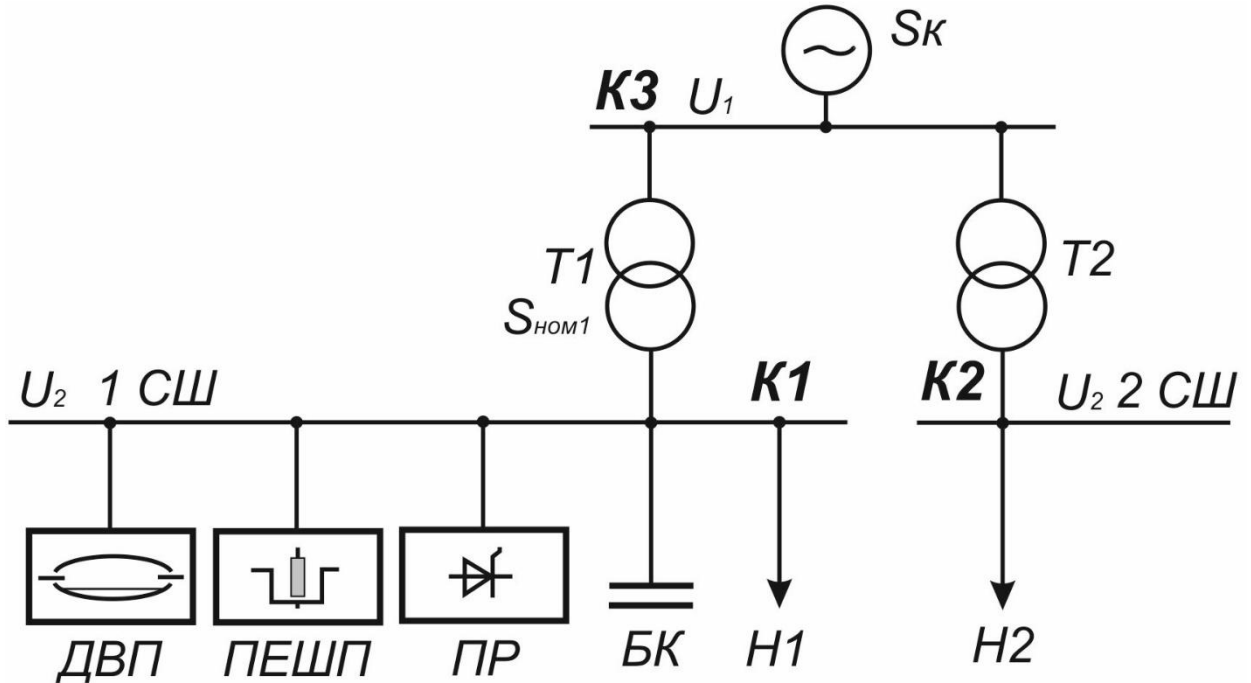
1.	Дугова вакуумна піч ДВП : Повна потужність навантаження $S_{двп}$, МВА Відносна провідність зворотної послідовності y^{*1} Коефіцієнт потужності $\cos\varphi_1$	12 0,52 0,7
2.	Піч електрошлакового переплаву ПЕШП : Повна потужність навантаження $S_{пешп}$, МВА Відносна провідність зворотної послідовності y^{*2} Коефіцієнт потужності $\cos\varphi_2$ Відносне значення струму зворотної послідовності I^{*2}	7 1 0,7 1,65

3. Вихідні дані про нелінійне навантаження

1.	Потужність перетворювача $S_{пр}$, МВА	12
2.	Номінальна потужність трансформатора перетворювача $S_{ном T}$, МВА	16
3.	Фазність перетворювача	6
4.	Коефіцієнт потужності $\cos\varphi_{пр}$	0,8

ВАРІАНТ №5

Спрощена схема електропостачання промислового підприємства



1. Вихідні дані про систему електропостачання

1.	Потужність КЗ на стороні ВН S_k , МВА	1000
2.	Напруга сторони ВН підстанції U_1 , кВ	110
3.	Напруга сторони НН підстанції U_2 , кВ	10
4.	Потужність БК на 1СШ $Q_{БК}$, Мвар	8
5.	Потужність трансформаторів ГПП $S_{ном1}$, МВА	2×16
6.	Потужність цехових трансформаторів КТП $S_{ном2}$, МВА	2×1,0
7.	Потужність високовольтних асинхронних двигунів $S_{номAD}$, МВт	2×0,8
8.	Тип та перетин кабелів у розподільчій мережі підприємства Довжина КЛ $L_{кл}$, км	СБН 3×95 1,8
9.	Навантаження H1 : Повна потужність навантаження S_{H1} , МВА Відносна провідність зворотної послідовності y^*_{3} Коефіцієнт потужності $\cos\varphi_3$	4 5 0,8
10.	Навантаження H2 : Повна потужність навантаження S_{H2} , МВА Відносний повний опір зворотної послідовності \dot{z}_2	8 0,5+j0,56

2. Вихідні дані про несиметричне навантаження

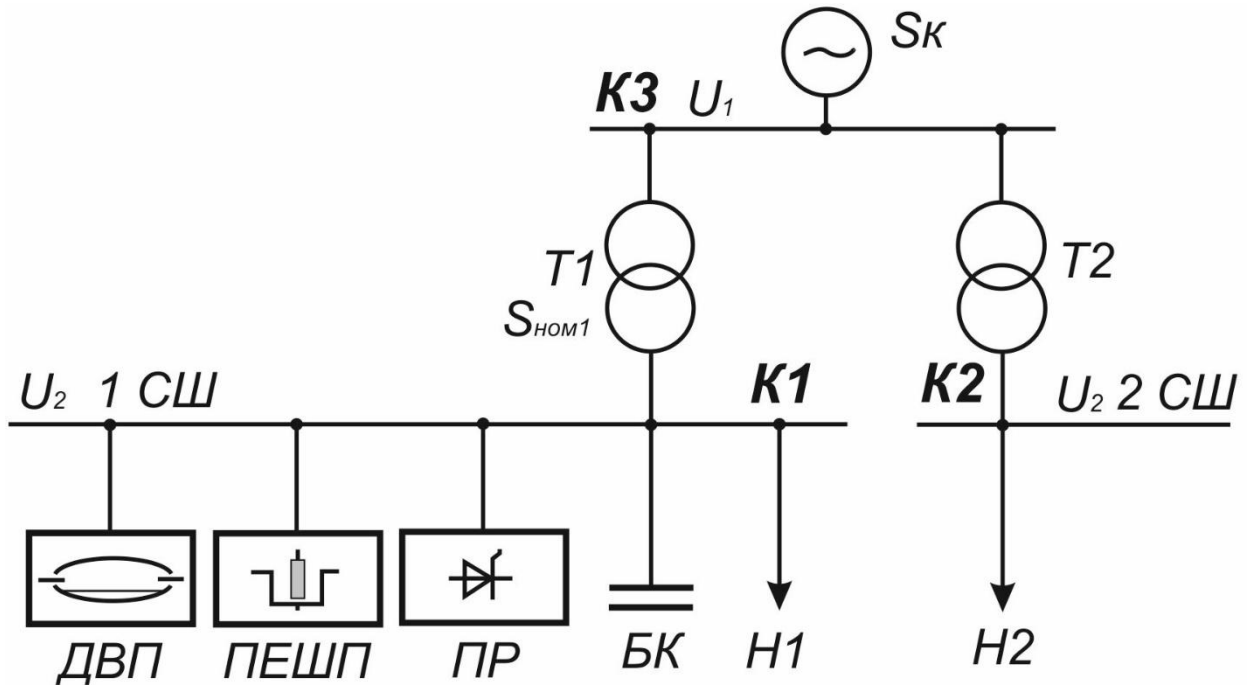
1.	Дугова вакуумна піч ДВП : Повна потужність навантаження $S_{двп}$, МВА Відносна провідність зворотної послідовності y^{*1} Коефіцієнт потужності $\cos\varphi_1$	6 0,6 0,7
2.	Піч електрошлакового переплаву ПЕШП : Повна потужність навантаження $S_{пешп}$, МВА Відносна провідність зворотної послідовності y^{*2} Коефіцієнт потужності $\cos\varphi_2$ Відносне значення струму зворотної послідовності I^{*2}	7 1 0,7 1,65

3. Вихідні дані про нелінійне навантаження

1.	Потужність перетворювача $S_{пр}$, МВА	10
2.	Номінальна потужність трансформатора перетворювача $S_{ном T}$, МВА	12
3.	Фазність перетворювача	12
4.	Коефіцієнт потужності $\cos\varphi_{пр}$	0,8

ВАРІАНТ №6

Спрощена схема електропостачання промислового підприємства



1. Вихідні дані про систему електропостачання

1.	Потужність КЗ на стороні ВН S_k , МВА	1200
2.	Напруга сторони ВН підстанції U_1 , кВ	110
3.	Напруга сторони НН підстанції U_2 , кВ	6
4.	Потужність БК на 1СШ $Q_{БК}$, Мвар	8
5.	Потужність трансформаторів ГПП $S_{ном1}$, МВА	2×16
6.	Потужність цехових трансформаторів КТП $S_{ном2}$, МВА	3×1,0
7.	Потужність високовольтних асинхронних двигунів $S_{номаД}$, МВт	2×0,8
8.	Тип та перетин кабелів у розподільчій мережі підприємства Довжина КЛ $L_{кл}$, км	СБН 3×70 2,2
9.	Навантаження H1 : Повна потужність навантаження S_{H1} , МВА Відносна провідність зворотної послідовності y^*_3 Коефіцієнт потужності $\cos\varphi_3$	5 5 0,8
10.	Навантаження H2 : Повна потужність навантаження S_{H2} , МВА Відносний повний опір зворотної послідовності \dot{z}_2	6 0,5+j0,56

2. Вихідні дані про несиметричне навантаження

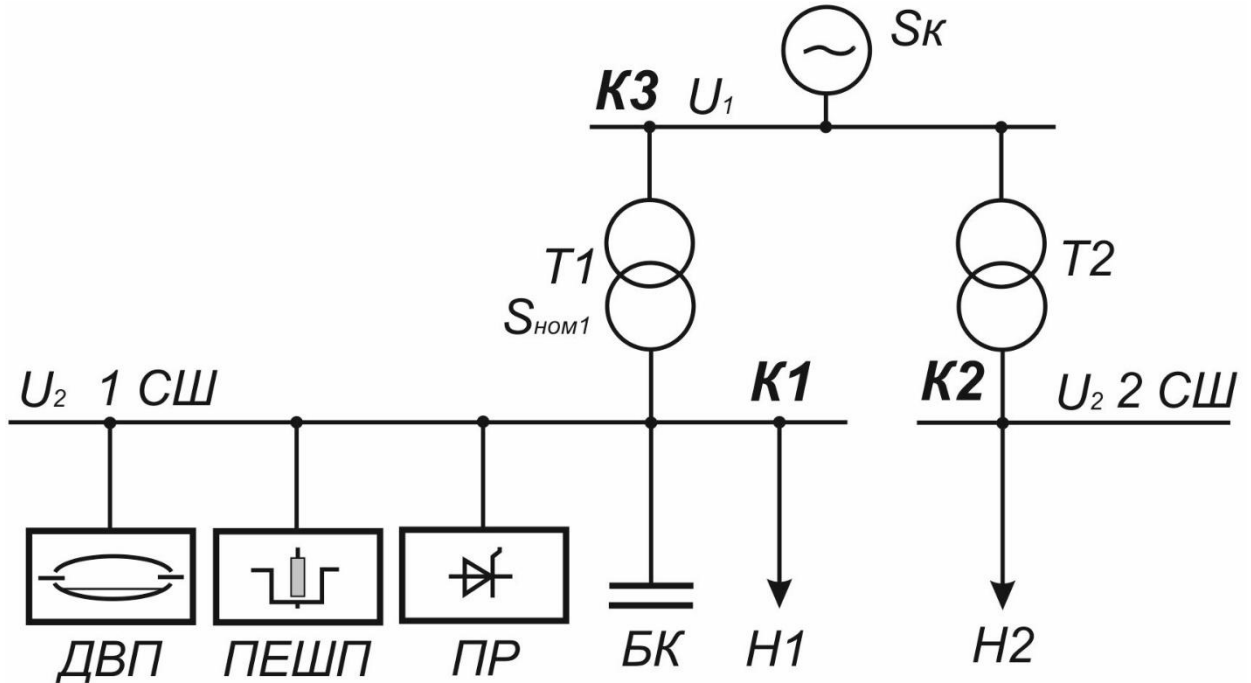
1.	Дугова вакуумна піч ДВП : Повна потужність навантаження $S_{двп}$, МВА Відносна провідність зворотної послідовності y^*1 Коефіцієнт потужності $\cos\phi_1$	4 0,6 0,7
2.	Піч електрошлакового переплаву ПЕШП : Повна потужність навантаження $S_{пешп}$, МВА Відносна провідність зворотної послідовності y^*2 Коефіцієнт потужності $\cos\phi_2$ Відносне значення струму зворотної послідовності I^*2	6 1 0,7 1,4

3. Вихідні дані про нелінійне навантаження

1.	Потужність перетворювача $S_{пр}$, МВА	12
2.	Номінальна потужність трансформатора перетворювача $S_{ном T}$, МВА	16
3.	Фазність перетворювача	6
4.	Коефіцієнт потужності $\cos\phi_{пр}$	0,78

ВАРІАНТ №7

Спрощена схема електропостачання промислового підприємства



1. Вихідні дані про систему електропостачання

1.	Потужність КЗ на стороні ВН S_k , МВА	800
2.	Напруга сторони ВН підстанції U_1 , кВ	110
3.	Напруга сторони НН підстанції U_2 , кВ	10
4.	Потужність БК на 1СШ $Q_{БК}$, Мвар	4
5.	Потужність трансформаторів ГПП $S_{ном1}$, МВА	2×10
6.	Потужність цехових трансформаторів КТП $S_{ном2}$, МВА	3×0,4
7.	Потужність високовольтних асинхронних двигунів $S_{номAD}$, МВт	2×0,8
8.	Тип та перетин кабелів у розподільчій мережі підприємства Довжина КЛ $L_{кл}$, км	СБН 3×70 2,8
9.	Навантаження H1 : Повна потужність навантаження S_{H1} , МВА Відносна провідність зворотної послідовності y^*_{3} Коефіцієнт потужності $\cos\varphi_3$	5 5 0,8
10.	Навантаження H2 : Повна потужність навантаження S_{H2} , МВА Відносний повний опір зворотної послідовності \dot{z}_2	7 0,45+j0,56

2. Вихідні дані про несиметричне навантаження

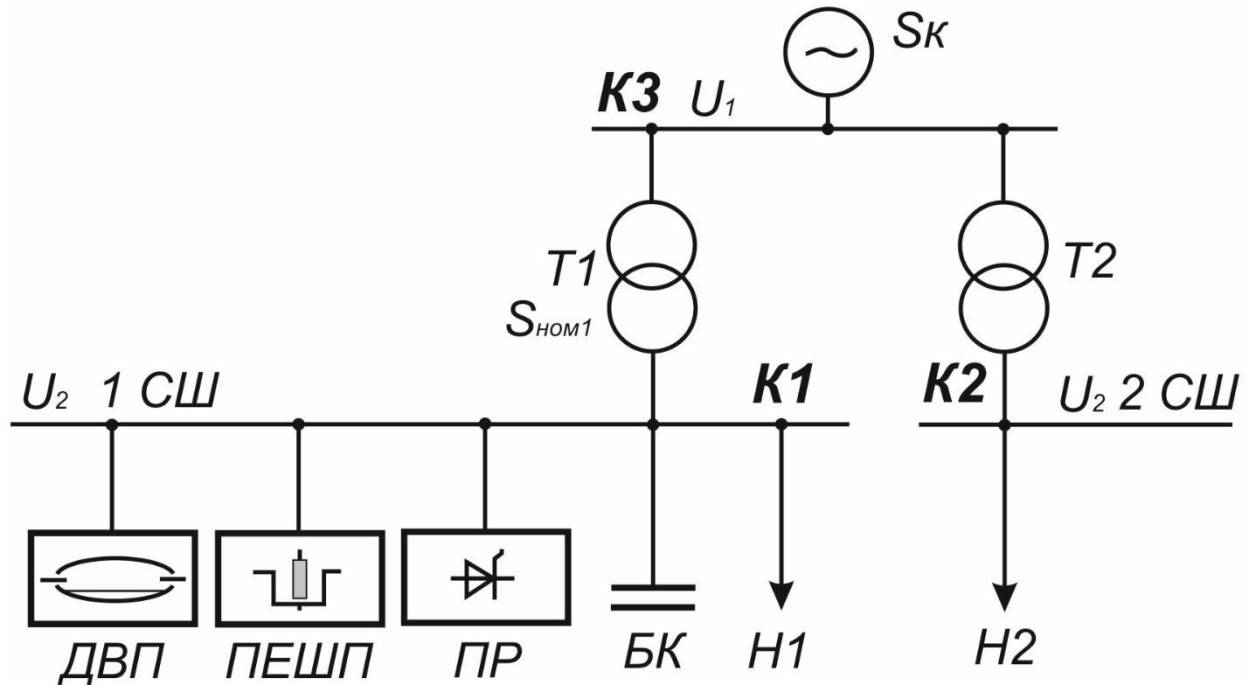
1.	Дугова вакуумна піч ДВП : Повна потужність навантаження $S_{двп}$, МВА Відносна провідність зворотної послідовності y^{*1} Коефіцієнт потужності $\cos\varphi_1$	3 0,8 0,7
2.	Піч електрошлакового переплаву ПЕШП : Повна потужність навантаження $S_{пешп}$, МВА Відносна провідність зворотної послідовності y^{*2} Коефіцієнт потужності $\cos\varphi_2$ Відносне значення струму зворотної послідовності I^{*2}	6 1 0,7 1,4

3. Вихідні дані про нелінійне навантаження

1.	Потужність перетворювача $S_{пр}$, МВА	2
2.	Номінальна потужність трансформатора перетворювача $S_{ном T}$, МВА	2,5
3.	Фазність перетворювача	6
4.	Коефіцієнт потужності $\cos\varphi_{пр}$	0,8

ВАРІАНТ №8

Спрощена схема електропостачання промислового підприємства



1. Вихідні дані про систему електропостачання

1.	Потужність КЗ на стороні ВН S_k , МВА	1200
2.	Напруга сторони ВН підстанції U_1 , кВ	110
3.	Напруга сторони НН підстанції U_2 , кВ	6
4.	Потужність БК на 1СШ $Q_{БК}$, Мвар	4
5.	Потужність трансформаторів ГПП $S_{ном1}$, МВА	2×10
6.	Потужність цехових трансформаторів КТП $S_{ном2}$, МВА	4×0,4
7.	Потужність високовольтних асинхронних двигунів $S_{номAD}$, МВт	2×0,8
8.	Тип та перетин кабелів у розподільчій мережі підприємства Довжина КЛ $L_{кл}$, км	СБН 3×70 2,8
9.	Навантаження H1 : Повна потужність навантаження S_{H1} , МВА Відносна провідність зворотної послідовності y^*_{Δ} Коефіцієнт потужності $\cos\varphi_{\Delta}$	5 5 0,8
10.	Навантаження H2 : Повна потужність навантаження S_{H2} , МВА Відносний повний опір зворотної послідовності \dot{z}_2	7 0,45+j0,56

2. Вихідні дані про несиметричне навантаження

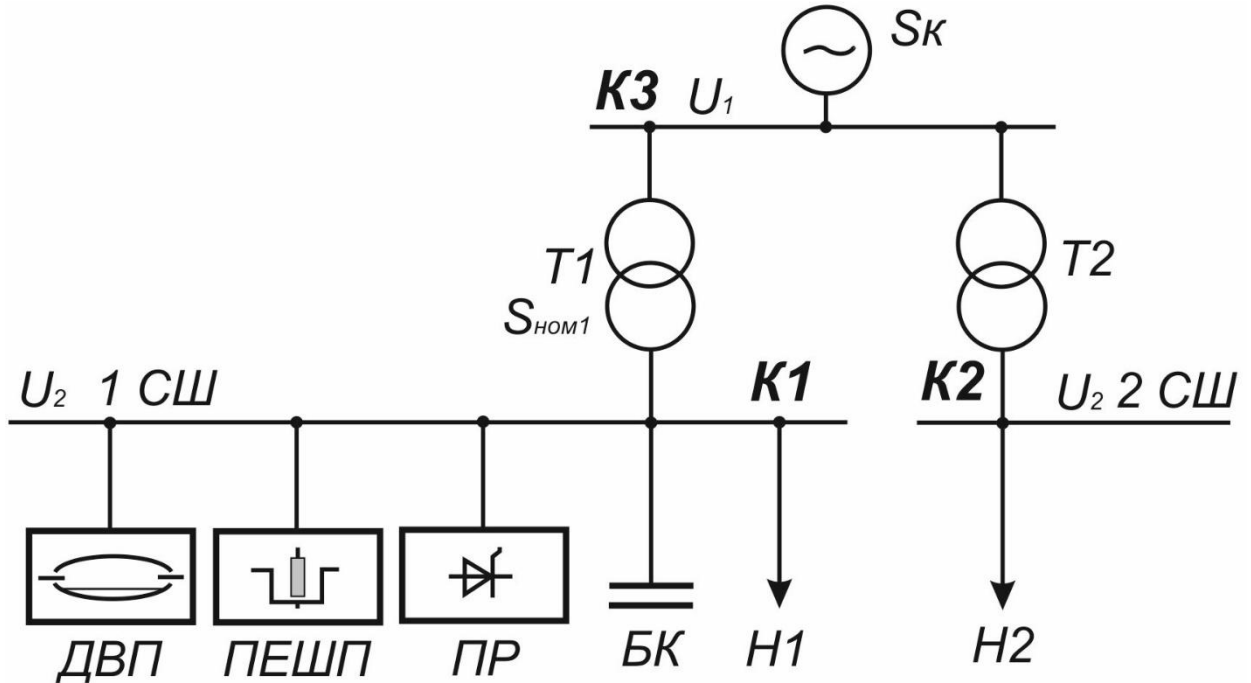
1.	Дугова вакуумна піч ДВП : Повна потужність навантаження $S_{двп}$, МВА Відносна провідність зворотної послідовності y^{*1} Коефіцієнт потужності $\cos\varphi_1$	3 0,8 0,7
2.	Піч електрошлакового переплаву ПЕШП : Повна потужність навантаження $S_{пешп}$, МВА Відносна провідність зворотної послідовності y^{*2} Коефіцієнт потужності $\cos\varphi_2$ Відносне значення струму зворотної послідовності I^{*2}	6 1 0,7 1,4

3. Вихідні дані про нелінійне навантаження

1.	Потужність перетворювача $S_{пр}$, МВА	2
2.	Номінальна потужність трансформатора перетворювача $S_{ном T}$, МВА	2,5
3.	Фазність перетворювача	6
4.	Коефіцієнт потужності $\cos\varphi_{пр}$	0,8

ВАРІАНТ №9

Спрощена схема електропостачання промислового підприємства



1. Вихідні дані про систему електропостачання

1.	Потужність КЗ на стороні ВН S_k , МВА	800
2.	Напруга сторони ВН підстанції U_1 , кВ	150
3.	Напруга сторони НН підстанції U_2 , кВ	6
4.	Потужність БК на 1СШ $Q_{БК}$, Мвар	4
5.	Потужність трансформаторів ГПП $S_{ном1}$, МВА	2×10
6.	Потужність цехових трансформаторів КТП $S_{ном2}$, МВА	3×0,4
7.	Потужність високовольтних асинхронних двигунів $S_{номAD}$, МВт	2×0,8
8.	Тип та перетин кабелів у розподільчій мережі підприємства Довжина КЛ $L_{кл}$, км	СБН 3×70 2,8
9.	Навантаження Н1 : Повна потужність навантаження $S_{Н1}$, МВА Відносна провідність зворотної послідовності y^*_3 Коефіцієнт потужності $\cos\varphi_3$	5 5 0,8
10.	Навантаження Н2 : Повна потужність навантаження $S_{Н2}$, МВА Відносний повний опір зворотної послідовності \dot{z}_2	7 0,45+j0,56

2. Вихідні дані про несиметричне навантаження

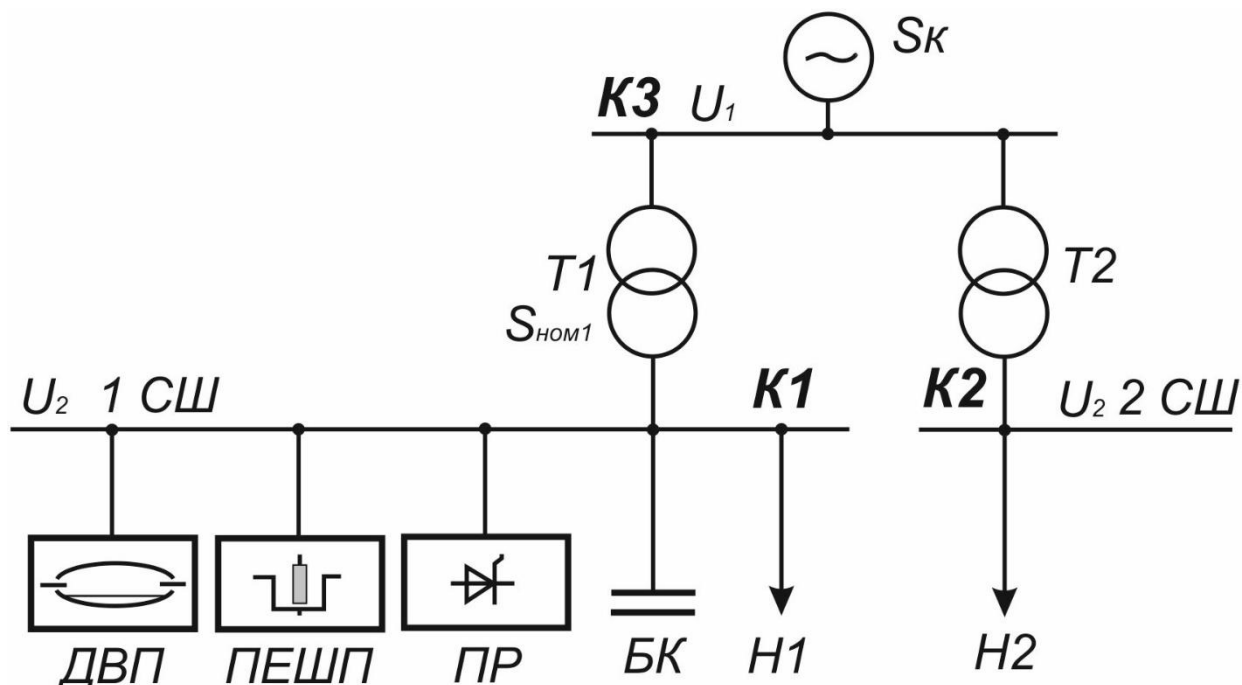
1.	Дугова вакуумна піч ДВП : Повна потужність навантаження $S_{двп}$, МВА Відносна провідність зворотної послідовності y^{*1} Коефіцієнт потужності $\cos\varphi_1$	3 0,8 0,7
2.	Піч електрошлакового переплаву ПЕШП : Повна потужність навантаження $S_{пешп}$, МВА Відносна провідність зворотної послідовності y^{*2} Коефіцієнт потужності $\cos\varphi_2$ Відносне значення струму зворотної послідовності I^{*2}	6 1 0,7 1,4

3. Вихідні дані про нелінійне навантаження

1.	Потужність перетворювача $S_{пр}$, МВА	2
2.	Номінальна потужність трансформатора перетворювача $S_{ном T}$, МВА	2,5
3.	Фазність перетворювача	6
4.	Коефіцієнт потужності $\cos\varphi_{пр}$	0,8

ВАРІАНТ №10

Спрощена схема електропостачання промислового підприємства



1. Вихідні дані про систему електропостачання

1.	Потужність КЗ на стороні ВН S_k , МВА	800
2.	Напруга сторони ВН підстанції U_1 , кВ	220
3.	Напруга сторони НН підстанції U_2 , кВ	6
4.	Потужність БК на 1СШ $Q_{БК}$, Мвар	4
5.	Потужність трансформаторів ГПП $S_{ном1}$, МВА	2×10
6.	Потужність цехових трансформаторів КТП $S_{ном2}$, МВА	3×0,4
7.	Потужність високовольтних асинхронних двигунів $S_{номAD}$, МВт	2×0,8
8.	Тип та перетин кабелів у розподільчій мережі підприємства Довжина КЛ $L_{кл}$, км	СБН 3×70 2,8
9.	Навантаження Н1 : Повна потужність навантаження $S_{Н1}$, МВА Відносна провідність зворотної послідовності y^*_3 Коефіцієнт потужності $\cos\varphi_3$	5 5 0,8
10.	Навантаження Н2 : Повна потужність навантаження $S_{Н2}$, МВА Відносний повний опір зворотної послідовності \dot{z}_2	7 0,45+j0,56

2. Вихідні дані про несиметричне навантаження

1.	Дугова вакуумна піч ДВП : Повна потужність навантаження $S_{двп}$, МВА Відносна провідність зворотної послідовності y^*1 Коефіцієнт потужності $\cos\varphi_1$	3 0,8 0,7
2.	Піч електрошлакового переплаву ПЕШП : Повна потужність навантаження $S_{пешп}$, МВА Відносна провідність зворотної послідовності y^*2 Коефіцієнт потужності $\cos\varphi_2$ Відносне значення струму зворотної послідовності I^*2	6 1 0,7 1,4

3. Вихідні дані про нелінійне навантаження

1.	Потужність перетворювача $S_{пр}$, МВА	2
2.	Номінальна потужність трансформатора перетворювача $S_{ном T}$, МВА	2,5
3.	Фазність перетворювача	6
4.	Коефіцієнт потужності $\cos\varphi_{пр}$	0,8



4 ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Дати характеристику відхиленню напруги як показнику якості напруги. Негативні наслідки, пов'язані з погіршенням якості напруги.
2. Дати характеристику коливанням напруги як показнику якості напруги. Негативні наслідки, пов'язані з погіршенням якості напруги.
3. Негативні наслідки для систем електропостачання, пов'язані з погіршенням несинусоїдальності напруги.
4. Дати характеристику вітрогенеруючим установкам як джерелам електромагнітних завад.
5. Дати характеристику несиметрії напруги як показнику якості напруги. Негативні наслідки, пов'язані з несиметрією.
6. Дати характеристику сонячним енергетичним установкам як джерелам електромагнітних завад.
7. Дати характеристику терміну «вищі гармоніки» та «інтергармоніки».
8. Дати характеристику зварювальним установкам як джерелам електромагнітних завад.
9. Дати характеристику провалам напруги як показнику якості напруги. Основні джерела провалів напруги.
10. Дати характеристику імпульсам напруги як показнику якості напруги. Основні джерела імпульсів напруги.

РЕКОМЕНДОВАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими : монографія / Т. М. Базюк та ін. ; ред. О. В. Кириленко. Київ : Ін-т електродинаміки НАН України, 2016. 399 с.
2. Zhezhelenko I. V., Papaika Y., Pivnyak G. Transients in Electric Power Supply Systems. Trans Tech Publications, Limited, 2016. 382 p.
3. Перехідні процеси в системах електропостачання / Г. Г. Півняк та ін. НТУ «ДП». 6-те вид., доопрац. та допов. Дніпро: Грані, 2024. 712 с.
4. Електромагнітна сумісність у системах електропостачання : підручник / І. В. Жежеленко та ін. Дніпро : Нац. гірнич. ун-т, 2009. 319 с.
5. ENTSO-E, ENTSO-G Overview of the selected/proposed gas and electricity TYNDP 2018 2040 story lines, 19 September 2016 / Entso-E. 11 p. (Препринт / ENTSO-E AISBL. Avenue de Cortenbergh 100, 1000 Brussels, Belgium). URL: [www/entsoe.eu](http://www.entsoe.eu) (дата звернення: 10.06.2025).
6. Півняк Г. Г., Жежеленко І. В., Папаїка Ю.А. Енергетична ефективність систем електропостачання. Д.: НТУ «ДП», 2018. 149 с.
7. Реактивна потужність в електричних мережах / Г. Г. Півняк та ін. НТУ «ДП», 2020. 72 с.
8. Стійкість режиму енергосистеми з розподіленою генерацією / Кириленко О.В. та ін. НТУ «ДП». Дніпро : Грані, 2024. 284 с.
9. Pivnyak G., Zhezhelenko I., Papaika Yu. Normalization of voltage quality as the way to ensure energy saving in power supply systems. Energy Efficiency Improvement of Geotechnical Systems : proceedings of the International Forum on Energy Efficiency. 2013. P. 11–18. DOI: <https://doi.org/10.1201/b16355-3>.
10. Pivnyak G. G., Zhezhelenko I. V., Papaika Yu. A. Estimating economic equivalent of reactive power in the systems of enterprise power supply. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2016. №5. P. 62-66.
11. Pivnyak G. G., Zhezhelenko I. V., Papaika Yu. A., Lysenko O. H. Interharmonics in power supply systems. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2017. № 6. P. 109-114.
12. Papaika Yu. A., Lysenko O. H., Koshelenko Ye. V., Olishevskiy I. H. Mathematical modeling of power supply reliability at low voltage quality. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2021. № 2. P. 97–103. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-2/097>.

ДОДАТОК А. СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ МЕРЕЖІ

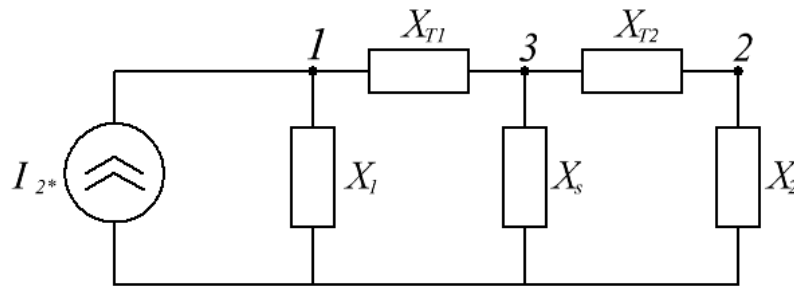


Рис.1. Схема заміщення зворотної послідовності мережі

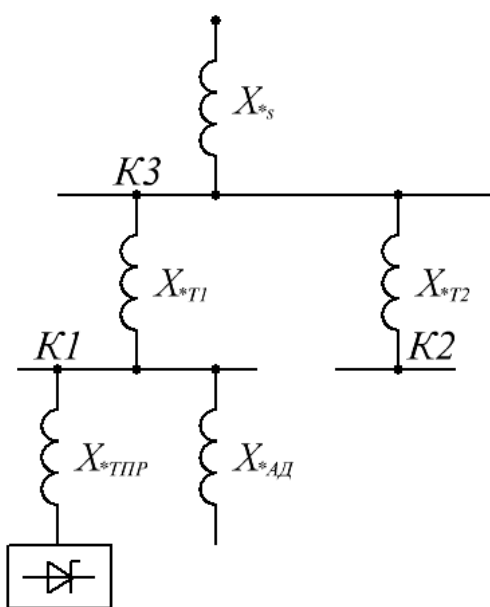


Рис.2. Схема заміщення мережі

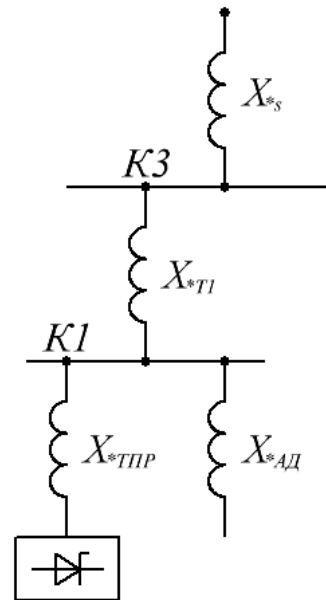


Рис.3.Схема заміщення мережі приведена до точки К3

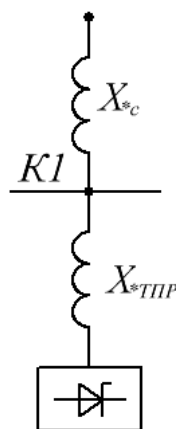
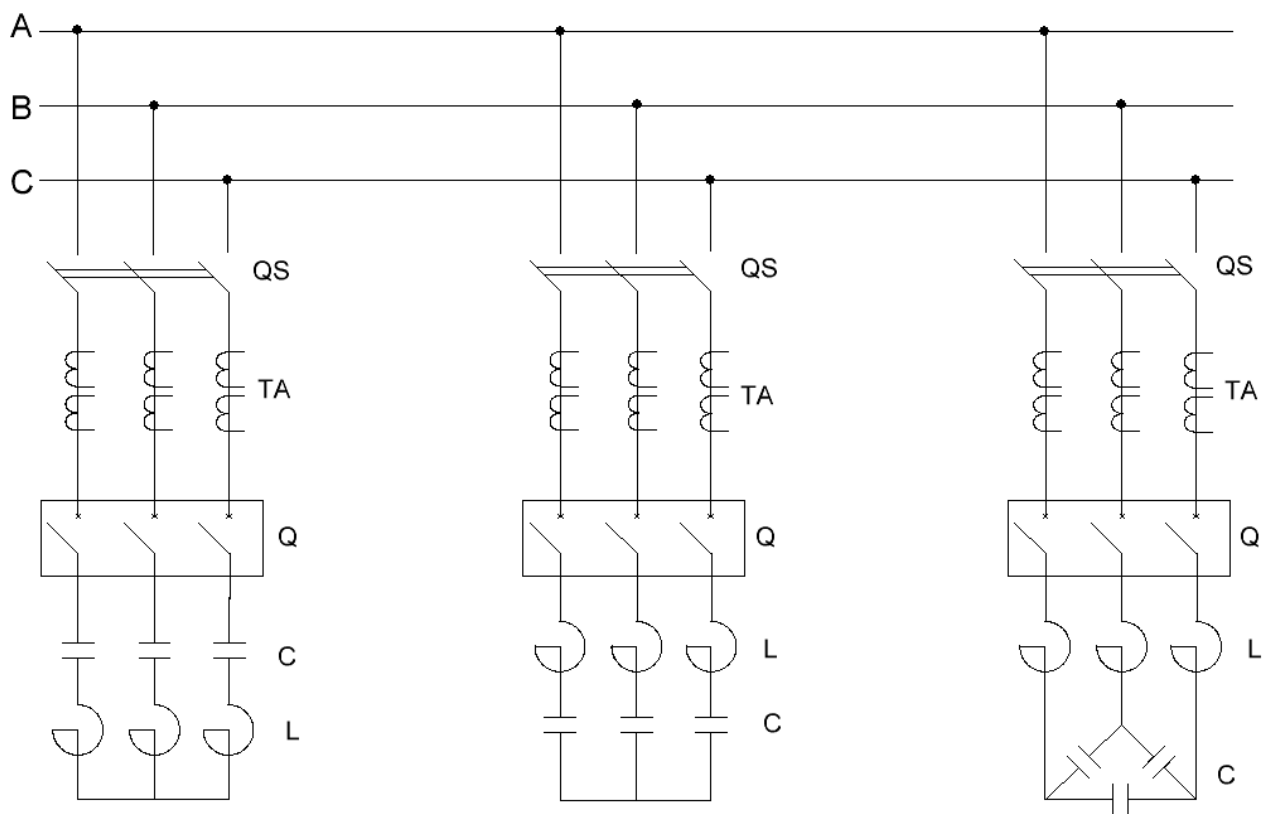
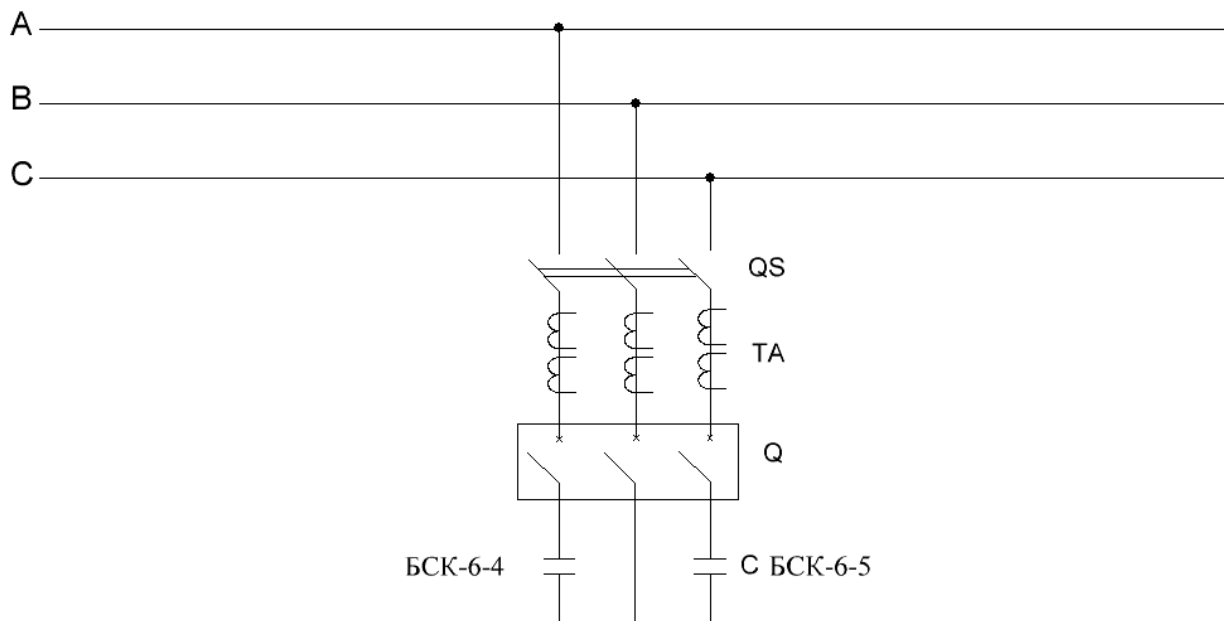


Рис.4. Схема заміщення мережі приведена до точки К1

ДОДАТОК Б. СХЕМИ УЛАШТУВАННЯ





Навчально-методичне видання

Юрій Анатолійович ПАПАЇКА
Олександра Геннадіївна ЛИСЕНКО

**Методичні вказівки до виконання індивідуальних завдань з
дисципліни «Електромагнітна сумісність у системах
електрозабезпечення»**

Самостійне електронне мережеве видання

Публікується в авторській редакції