

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до виконання індивідуального завдання №2  
на тему «Дослідження проблематики електромагнітної сумісності в  
умовах гірничих та металургійних підприємств»

з дисципліни

**«СИСТЕМИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО ЕЛЕКТРОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ»**

Запоріжжя 2024



## УКЛАДАЧ(І):

- 1 Папаїка Юрій, доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем;

## УЗГОДЖЕНО:

Гарант освітньої програми  
«Енергоефективні технології в  
системах електрозабезпечення  
гірничих та металургійних  
підприємств»

Віктор ХІЛОВ

## ЗАТВЕРДЖЕНО

Завідувач кафедри

Олексій КОЙФМАН



## **1 ВСТУП**


### **ПРОБЛЕМА ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ У ПРОМИСЛОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ**

Підвищення енергетичної ефективності виробництва, передачі і розподілу електроенергії було і залишається однією з найважливіших проблем сучасної енергетики. До кола питань цієї комплексної проблеми входять такі складові, як зниження технологічних втрат, підвищення якості електроенергії та надійності функціонування електричних мереж і систем, аналіз і корекція діючих в даний час нормативів. Ефект від вирішення цієї проблеми залежить не тільки від скорочення споживання енергоресурсів, а й від впровадження нових інноваційних процесів в системах електропостачання та енергетичних системах. Це пов'язано з недоліками сучасної енергетики, та значною мірою стосується України. Так, відносні втрати електроенергії в електричних мережах України в 2022 році досягли 20%. Значення відносних втрат електроенергії в електричних мережах промислово розвинених країн, по усередненим даним за 2013 -2015 роки, знаходяться в межах 4-7%. Таким чином, фактичні втрати в електричних мережах України в 1,5-2,5 рази вище, ніж в електричних мережах промислово розвинених країн світу. Ця ситуація погіршилась з початком повномасштабного вторгнення росії та введенні воєнного стану.

Очевидно існує досить щільний зв'язок значень втрат електроенергії в електричних мережах різних країн з економікою цих країн. У країнах з розвинутою економікою, як правило, вище технічна культура виробництва, передачі і розподілу електроенергії, використовуються більш сучасні системи управління режимами роботи електричних мереж, контролю і обліку електроенергії, діє чітка нормативно-правова база і система тарифного регулювання.

Високий рівень втрат в електричних мережах пов'язаний також з невирішеністю таких проблем, як низький рівень компенсації реактивної потужності, явно недостатнє використання засобів оптимізації режимів роботи і регулювання напруги, невирішеністю проблеми якості електричної енергії.

В даний час немає необхідності доводити важливість проблеми якості електроенергії. Вона відноситься до числа найважливіших у сучасній електроенергетиці та є частиною проблеми підвищення енергоефективності електричних мереж. Низький рівень якості електричної енергії призводить до значного зниження енергетичної ефективності електричних мереж за рахунок збільшення втрат активної та реактивної потужності, технологічних витрат електроенергії на її транспортування, до зниження терміну служби електрообладнання, збільшення капітальних вкладень в електричні мережі, порушення умов нормального функціонування енергетичної системи.



Безперервне зростання встановленої потужності нелінійних, несиметричних і різкозмінних навантажень не завжди супроводжувався своєчасним впровадженням рішень, спрямованих на корекцію якості електроенергії, навіть в промислово розвинених країнах Західної Європи.

У найбільшій мірі негативний вплив на енергоефективність надає несинусоїдальність напруги, яка обумовлена інтенсивним впровадженням нелінійних навантажень в електричних мережах. При цьому виникає викривлення синусоїдальної форми напруги і струму не тільки у самого споживача, але і в зовнішній мережі. У разі перевищення нормованих рівнів ці завади можуть привести не тільки до порушення перешкодостійкості технічних засобів (зокрема, пристроїв мікропроцесорного релейного захисту) в енергосистемі, на електростанціях і підстанціях, а й впливають на технологічний процес в системах електропостачання.


На сьогодні понад 60% електричної енергії в промисловості використовується в перетвореному вигляді (в металургії на деяких виробництвах – до 100%). Цьому сприяє, в значній мірі, впровадження частотних перетворювачів в системах електропривода. Як наслідок, не тільки істотно зростає рівень канонічних вищих гармонік, але з'являється широкий спектр так званих інтергармонік – міжгармонік. В останні роки помітно зросла кількість виходів з ладу електродвигунів внаслідок пошкодження ізоляції, так як значно збільшився еквівалентний рівень несинусоїдальності. Так, чинне значення інтергармонік безпосередніх перетворювачів частоти може, в залежності від режиму роботи, в кілька разів перевершувати їх номінальні значення (на основній частоті). Практика свідчить, що в цьому випадку вартість заходів по компенсації рівнів вищих гармонік може бути сувимірною або більше вартості збитку від впливу вищих гармонік і інтергармонік. Високі рівні гармонік істотно ускладнюють вирішення низки питань концепції Smart grid.

#### *Вплив електромагнітних перешкода на системи електропостачання*

Негативним впливом електромагнітних завад (ЕМЗ) є збільшення втрат в електрообладнанні і скорочення його терміну служби, а також функціональної надійності. При спільному впливі декількох ЕМЗ ступінь впливу виявляється більше, ніж їх сума.

**Відхилення напруги.** Головною причиною відхилень напруги у системах електропостачання (СЕП) є зміна навантажень, що викликається перш за все:

- режимом роботи споживачів електроенергії;
- зміною числа споживачів;
- оперативними перемиканнями;
- порушеннями роботи мережі.



Значення відхилення  $\delta U_t$  напруги в даному вузлі мережі є функцією багатьох змінних:

$$\delta U_t = fU(U_s, P, Q, Z, Y, \Sigma \delta U^d),$$

де  $P$  и  $Q$  - споживана активна та реактивна потужність в розглянутій мережі

$U_s$  - напруга мережі живлення;

$Z$  и  $Y$  - опір і провідність елементів мережі живлення;

$\Sigma \delta U^d$  - сума «добавок» - додаткове значення напруги (наприклад, в трансформаторі або трансформаторах мережі живлення).

**Несиметрія напруг** в СЕП 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, дугові сталеплавильні печі). Трифазна система напруг може бути несиметричною при живленні мережі підприємства від тягової підстанції змінного струму.

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


В *електричних машинах змінного струму* виникають магнітні поля, що обертаються з синхронною швидкістю в напрямку обертання ротора і 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 *асинхронних двигунах* (АД) при коефіцієнтах зворотній послідовності напруг, що зустрічаються на практиці ( $K_{2U} < 0,05 \div 0,06$ ), зниження обертового моменту АД виявляється дуже незначним. Вплив несиметрії на втрати в електродвигуні виражаються у додатковому нагріві та передчасному старінні ізоляції.

При несиметрії напруг мережі в *синхронних двигунах* (СД) поряд з виникненням додаткових втрат і нагріванням статора і ротора можуть виникнути небезпечні вібрації в результаті появи знакозмінних моментів, обертаючих моментів та тангенціальних сил, пульсуючих з подвійною частотою мережі.

При значній несиметрії вібрація може виявитися небезпечною, особливо при недостатній міцності або наявності дефектів зварних з'єднань. При несиметрії струмів, що не перевищує 30%, небезпечні перенапруження в елементах конструкцій, як правило, не виникають.

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 (РП), що видається в мережу. При цьому може виникнути необхідність знизити активне навантаження генератора або момент на валу СД.

**Коливання напруги** негативно позначаються на зоровому сприйнятті предметів, деталей, графічних зображень і, як результат, на продуктивності праці і зору працівників.

Фізіологічну основу сприйняття зорового образу становить, як відомо, робота зорового аналізатора, однією з основних частин якого служить рецептор. Його основна функція полягає в перетворенні енергії подразника, що діє в нервовий процес. Подразником зорового аналізатора є світлова енергія. Процеси, що відбуваються в зоровому аналізаторі біологічної системи, як і всі процеси в природі, мають енергетичний сенс, і процес зорового сприйняття носить енергетичний характер; то зоровий аналізатор має певні енергетичні характеристики.

**При наявності вищих гармонік (ВГ)** в СЕП з'являються додаткові втрати в електричних машинах, трансформаторах і мережах; ускладнюється компенсація реактивної потужності (КРП) за допомогою конденсаторних батарей; скорочується термін служби ізоляції електричних машин і апаратів; погіршується робота пристроїв захисту, автоматики, телемеханіки і зв'язку; мають місце і інші негативні наслідки.


При роботі асинхронних двигунів в умовах несинусоїдальної напруги його коефіцієнт потужності і обертовий момент на валу знижується. Практично вплив ВГ на коефіцієнт потужності АД можна не враховувати. Те саме можна сказати і до моментів, що розвиваються через ВГ струму - вони не перевищують кількох десятих відсотка моменту, що розвивається при промисловій частоті.

Батареї конденсаторів (БК) можуть тривало працювати при перевантаженні їх струмами ВГ не більше ніж на 30%, допустиме підвищення напруги становить 10%. Однак в цих умовах термін їх служби скорочується. У СЕП промислових підприємств, як правило, БК можуть виявитися в режимі, близькому до резонансу струмів на частоті будь-якої з гармонік. Через перевантаження вони виходять з ладу.

Облік електроенергії при несинусоїдальних режимах визначається значними похибками. Їх значення залежать від вимірювальної системи лічильника і його частотної характеристики, місця установки лічильника (на лінійному або нелінійному навантаженні) та інших факторів.

При вимірюванні потужності нелінійного навантаження  $P_{нл}$  мають місце два зустрічні потоки потужності: основні частоти  $P_1$  та ВГ  $\sum_{n=2}^{\infty} P_n$ .

Нелінійне навантаження є джерелом ВГ, тому


$$P_{нл} = P_1 - \sum_{n=2}^{\infty} \Delta P_n$$

і відповідно для лінійного навантаження

$$P_{л} = P_1 + \sum_{n=2}^{\infty} \Delta P_n .$$

Ці вирази легко перетворюються до вигляду

$$P_{нл} = P_1 (1 - \gamma_{сч}) \text{ и } P_{л} = P_1 (1 + \gamma_{сч}),$$

де  $\gamma_{сч} = \sum_{n=2}^{\infty} \Delta P_n / P_1$  - суму похибок лічильника на частотах ВГ.

При  $n > 1$  частотна похибка індукційного лічильника негативна, тому  $\gamma_{сч} < 1$ . Останні вирази дозволяють зробити висновок, що при нелінійних навантаженнях відбувається переоблік електроенергії, при лінійних - недооблік.

**Результати впливу інтергармонік (ІГ).** Токи ІГ викликають спотворення напруги в залежності від амплітуди складових струму і опору системи електропостачання на розглянутій частоті. Чим більше гамма частот складових струму, тим більше ризик виникнення небажаних резонансних явищ, які можуть збільшити спотворення напруги і призвести до перевантаження або порушення роботи обладнання споживача.

Найбільш поширеними наслідками впливу ІГ є:

- тепловий ефект;
- низькочастотні коливання механічних систем;
- проблеми в роботі флуоресцентних ламп і електронного устаткування;
- створення перешкод сигналам захисту і управління;
- перевантаження пасивних фільтрів ВГ;
- завади для телекомунікацій;
- акустичний вплив;
- насичення вимірювальних трансформаторів.

**Провали напруги (ПН)** виникають при комутації потужних електроприймачів, при відключенні повітряних ліній в грозовий період з подальшим автоматичним повторним включенням (АПВ), при коротких замиканнях в СЕП і з інших причин.

У найбільшій мірі негативні наслідки провалів напруги позначаються на установках автоматики, телекомунікацій, релейного захисту.



## МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ЩОДО ВИКОНАННЯ КОНТРОЛЬНИХ РОБІТ

Починати роботу потрібно з вивчення вихідних даних задачі, умов, в яких функціонує чи буде функціонувати об'єкт, а також рекомендованої для вирішення завдань літератури.

Кожне завдання розбито на декілька часткових задач. Після з'ясування усіх питань, що поставлені в завданні, слід підібрати методи та моделі, які потрібні для розв'язування кожного з них.

***Відхилення напруги.*** При розв'язуванні питань щодо розрахунків відхилень напруги необхідно звернути увагу на те, що на вторинних шинах розподільних трансформаторів у мінімальному режимі доцільно утримувати номінальне значення напруги, а у максимальному – таке, що на п'ять відсотків більше. Виходячи саме з цього потрібно розраховувати добавки напруги у трансформаторах.

***Розрахунки коливань напруги.*** У завданнях з коливань напруги розраховувати розмахи (коливання) напруги необхідно для нормального та післяаварійного режимів системи електропостачання. Якщо з'ясується, що вони перевищують допустимі значення – розробити заходи для їх зменшення.

***Розрахунки несиметрії напруги.*** При розрахунках, зв'язаних з допустимістю підключення однофазних електроприймачів до шин головної знижувальної підстанції (ГЗП), слід звернути увагу на потужність короткого замикання у вузлі, в якому розраховується коефіцієнт асиметрії за напругою зворотної послідовності. Якщо ця потужність менша за 200 МВ·А, розрахунки необхідно виконувати за уточненими параметрами схеми заміщення.

***Розрахунки коефіцієнта викривлення синусоїдальності напруги.*** У завданнях, які розв'язуються за цією тематикою, слід приділити увагу розрахунку з вибору реактора для захисту батареї конденсаторів від пошкодження вищими гармоніками.

### ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ЗАВДАННЯ

Контрольна робота оформлюється після виконання усіх розрахунків і отримання бажаних результатів. Текст і розрахунки за формулами супроводжуються схемами, графіками, висновками, що розкривають сутність отриманих результатів.

Формули необхідно наводити лише один раз, а потім тільки посилатися на них.

Графічні матеріали подаються згідно з вимогами відповідних ДСТУ.

## ЗАВДАННЯ

### Тема 1. Розрахунок відхилень напруги

**Завдання 1.** Для споживача електроенергії (ЕЕ) із схемою електропостачання, що на рис. 1, вирішити наступні питання.

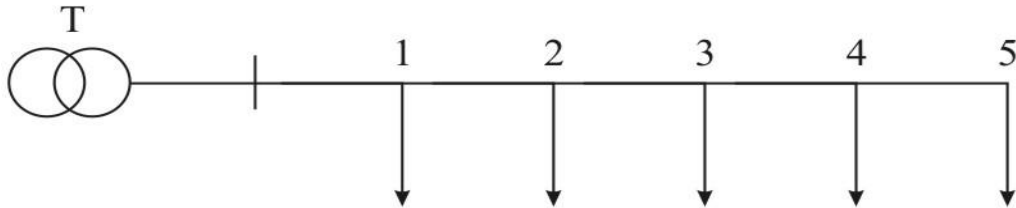


Рис. 1. Спрощена схема електричної мережі

✓ Обчислити ймовірність виходу відхилень напруги за допустимі нормальні розрахункові межі у *i-му* вузлі (рис. 1) та проаналізувати, чи буде якість ЕЕ у електроприймачів відповідати ДСТУ, якщо гістограма відхилень напруги в *i-му* вузлі за дві доби має вигляд, як на рис. 2.

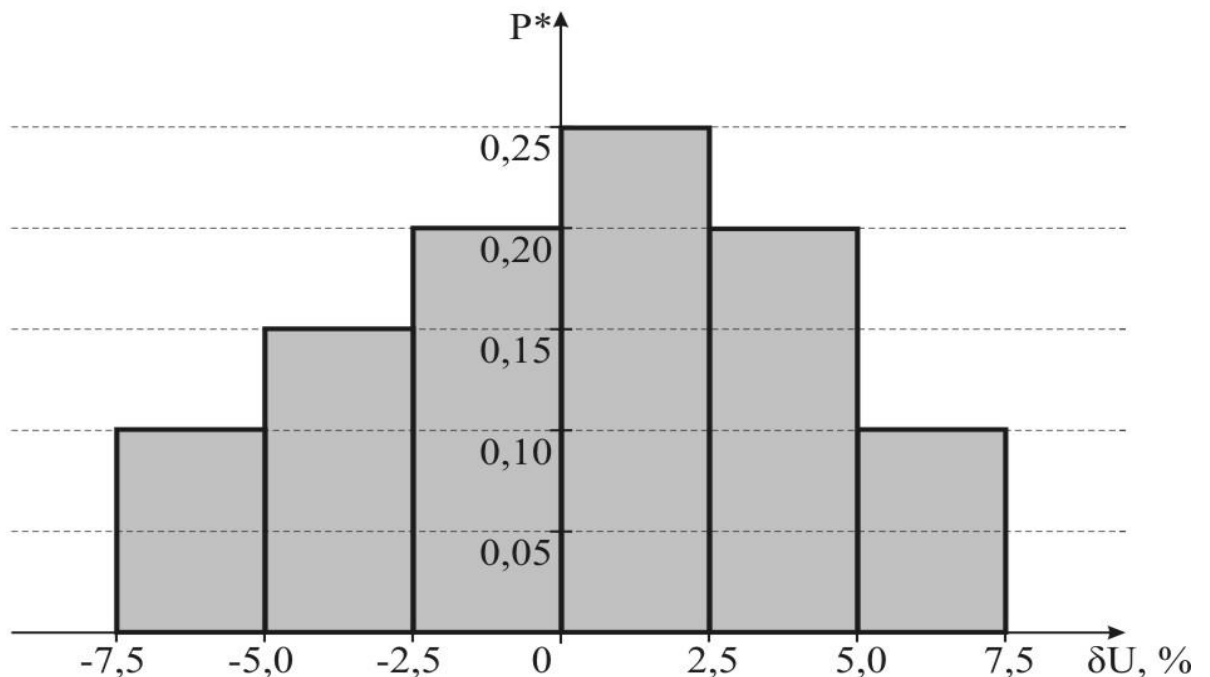


Рис. 2. Гістограма відхилень напруги

Допустимі нормальні значення відхилень напруги у цьому вузлі навантаження знаходяться у межах  $\pm \delta U$ , %.

✓ Розрахувати добавку  $E_{БК}$ , створювану батареєю конденсаторів поперечного вмикання потужністю  $Q_{БК}$ , квар, напругою 0,38 кВ, підключеною до  $i$ -го вузла (див. рис. 1), якщо опір ЛЕП до цього вузла дорівнює  $X_L$ , Ом.

✓ Зробити висновки щодо зміни якості ЕЕ у розрахунковому вузлі з урахуванням добавки  $E_{БК}$ .

Усі необхідні для розрахунків вихідні дані наведені на схемі електропостачання (рис. 1), гістограмі (рис.2) та у таблиці 1.

### **Розглянемо рішення даного завдання на прикладі:**

#### **Вихідні дані:**

- вузол живлення  $i - 1$ ;
- умовно допустимі відхилення напруги  $\pm \delta U$  у вузлі живлення – 0...+7,5%;
- потужність батареї конденсаторів в  $i$ -му вузлі  $Q_{БК} = 332$  квар;
- опір лінії від джерела живлення до  $i$ -го вузла  $X_L = 0,08$  Ом.

#### **Рішення.**

Відхиленням напруги є різниця між діючою  $U$  та номінальною  $U_n$  напругою, віднесена до номінальної напруги [1]:

$$V = \frac{U - U_i}{U_i} \cdot 100, \%$$

Ймовірність знаходження відхилення напруги в умовно нормально допустимих розрахункових межах в 1-ому вузлі:

$$P^* = 0,25 + 0,20 + 0,10 = 0,55; \quad \text{тобто } 55\%.$$

Ймовірність виходу відхилення напруги за умовно нормально допустимі розрахункові межі в 1-ому вузлі:

$$P_{вих}^* = 0,10 + 0,15 + 0,2 = 0,45; \quad \text{тобто } 45\%.$$

Згідно з ДСТУ EN 50160:2014 [1] якість електроенергії у електроприймачів в даному вузлі не відповідає нормованим значенням, так як необхідна ймовірність знаходження відхилення напруги в розрахункових межах  $\pm \delta U = 0 \dots +7,5\%$  повинна складати 95%, тобто ймовірність виходу  $P_{вих}^* = 0,05$ .

Добавка, яка створюється батареєю конденсаторів поперечного включення на напругу 0,38 кВ, що підключена до 1-го вузла [1]:



$$E_{\bar{\sigma}_k} = \Delta U_1 - \Delta U_2;$$

$$\Delta U_1 = \frac{P \cdot R + Q \cdot X_{л}}{U_n}; \Delta U_2 = \frac{P \cdot R + (Q - Q_{\bar{\sigma}_k}) \cdot X_{л}}{U_n};$$

$$E_{\bar{\sigma}_k} = \frac{Q_{\bar{\sigma}_k} \cdot X_{л}}{U_n} = \frac{332 \cdot 0,08}{0,38} = 69,9 \text{ В або}$$

$$E_{\bar{\sigma}_k \%} = \frac{Q_{\bar{\sigma}_k} \cdot X_{л}}{10 \cdot U_n^2} = \frac{332 \cdot 0,08}{10 \cdot 0,38^2} = 18,39 \text{ \%}.$$

Таблиця 1

| Показник  | Номер теми та варіанта |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|   | 1.1                    | 1.2  | 1.3  | 1.4  | 1.5  | 1.6  | 1.7  | 1.8  | 1.9  | 1.10 | 1.11 | 1.12 | 1.13 | 1.14 | 1.15 | 1.16 | 1.17 | 1.18 | 1.19 | 1.20 |
| Вузол живлення <i>i</i>   | 1                      | 2    | 3    | 4    | 5    | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
| Умовно допустимі відхилення напруги у вузлах живлення, %:             |                        |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| + $\delta U$  | 7,5                    | 5,0  | 5    | 7,5  | 5    | 2,5  | 2,5  | 0    | 5    | 0    | 7,5  | 5,0  | 2,5  | 5,0  | 2,5  | 5,0  | 2,5  | 0    | 2,5  | 0    |
| - $\delta U$  | 2,5                    | 0    | 2,5  | 0    | 7,5  | 5,0  | 5    | 5,0  | 2,5  | 7,5  | 0    | 2,5  | 2,5  | 0    | 7,5  | 5,0  | 2,5  | 5,0  | 5,0  | 7,5  |
| Потужність батареї конденсаторів $Q_{БК}$ , квар, у <i>i-му</i> вузлі | 216                    | 108  | 324  | 250  | 200  | 432  | 240  | 320  | 400  | 390  | 410  | 300  | 255  | 200  | 160  | 370  | 350  | 240  | 115  | 450  |
| Опір лінії $X_{л}$ , Ом, від джерела живлення до <i>i-го</i> вузла    | 0,07                   | 0,05 | 0,06 | 0,09 | 0,07 | 0,08 | 0,05 | 0,09 | 0,08 | 0,06 | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,08 | 0,09 | 0,1  | 0,05 | 0,08 | 0,07 |

## Тема 2. Розрахунок коливань напруги

**Завдання 1.** Для споживача ЕЕ зі схемою електропостачання, що на рис. 3 вирішити наступні питання.

✓ Розрахувати розмахи змін напруги у точках підключення дугових сталеплавильних печей (ДСП) (рис. 3). Потужність короткого замикання  $S_{кз2}$  наведена у табл. 2.

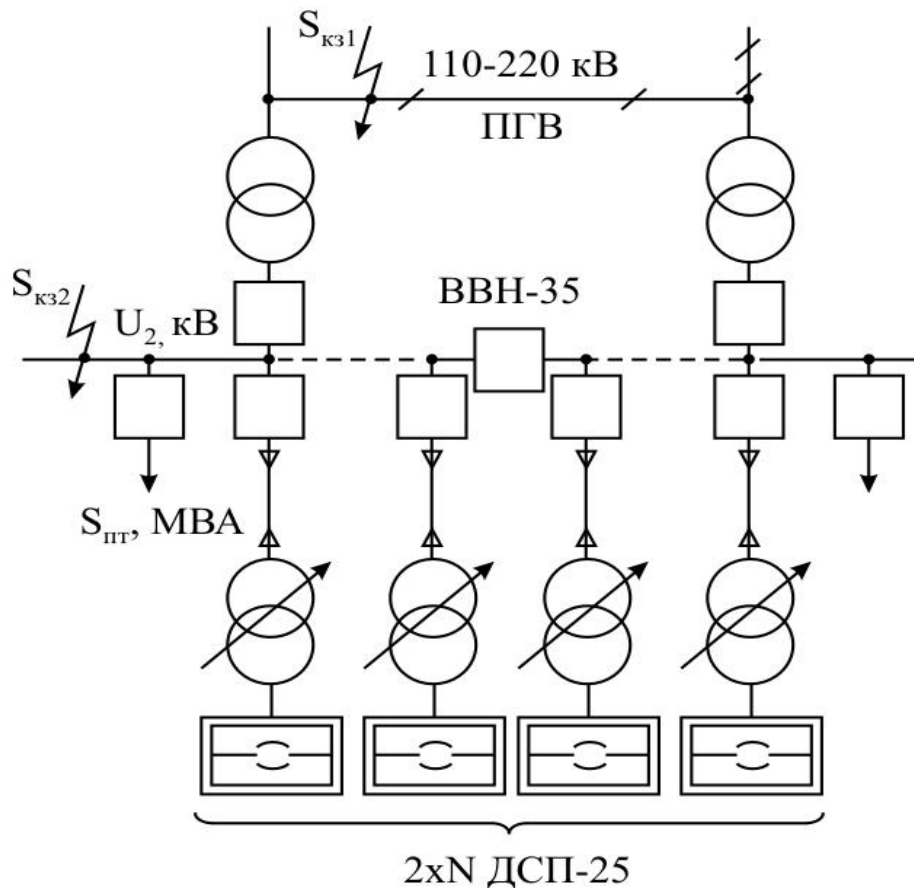


Рис. 3. Схема електропостачання потужних ДСП

✓ Визначити, чи припустиме живлення електроприймачів (ЕП) із спокійним навантаженням від цього вузла. У складі ЕП зі спокійним навантаженням є освітлювальні та силові установки. Частота періодичних коливань  $F$  також наведена у табл. 2. Зорове навантаження при виконанні робіт високе.

Дані, необхідні для розв'язування завдання, наведені у таблиці 2.

**Розглянемо рішення даного завдання на прикладі:**

**Вихідні дані:**

- кількість,  $N$ , та потужність ДСП –  $3 \times 16$  МВА;
- напруга  $U_2 = 6$  кВ;
- потужність короткого замикання  $S_{кз2} = 250$  МВА;
- частота періодичних коливань  $F = 310$  1/год.

### Рішення.

Розмах змін напруги у точках підключення дугових сталеплавильних печей (ДСП):

$$\delta U_t = \frac{S_n}{S_{кз}} \cdot 100\% ,$$

де  $S_n = \sqrt{\sum_{i=1}^N S_{n.m}^2}$  – потужність пічного навантаження, МВА;

$S_{i.\delta}$  – номінальна потужність трансформатора  $i$ -ої печі, МВА.

$$\delta U_t = \frac{\sqrt{3 \cdot 16^2}}{250} \cdot 100 = 11,1\% .$$

Допустимість коливань напруги визначається за умовою:

$$\delta U_{t.\text{доп}} \geq \delta U_t ;$$

де  $\delta U_{t.\text{доп}}$  – допустиме значення розмаху коливань напруги, %, яке визначається за кривою 2 (тому що присутні силові та освітлювальні установки) (рис. 1) [1] при частоті  $F$ .

$$F = 310 \text{ 1/год.} = 5,2 \text{ 1/хв.};$$

$$\delta U_{t.\text{доп}} = 1,7\% ;$$

$1,7\% < 11,1\%$  – умова не виконується.

Коливання напруги не завжди відповідають нормованим значенням, тому для їх досягнення вимагаються спеціальні заходи, які пов'язані з додатковими капіталовкладеннями.

Таблиця 2

| Показник                             | Номер теми та варіанту |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--------------------------------------|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                                      | 2.1                    | 2.2  | 2.3  | 2.4  | 2.5  | 2.6  | 2.7  | 2.8  | 2.9  | 2.10 | 2.11 | 2.12 | 2.13 | 2.14 | 2.15 | 2.16 | 2.17 | 2.18 | 2.19 | 2.20 |
| Кількість $N$ та потужність ДСП, МВА | 2x12                   | 3x12 | 2x13 | 3x13 | 1x13 | 2x25 | 2x13 | 3x13 | 2x13 | 3x25 | 2x25 | 4x12 | 2x13 | 2x25 | 2x12 | 4x13 | 4x25 | 2x25 | 3x13 | 3x25 |
| $U_2$ , кВ                           | 10                     | 6    | 10   | 35   | 10   | 35   | 10   | 6    | 10   | 10   | 35   | 35   | 6    | 10   | 35   | 10   | 35   | 10   | 35   | 10   |
| $S_{кз2}$ , МВА                      | 250                    | 180  | 350  | 700  | 210  | 720  | 240  | 150  | 270  | 200  | 240  | 900  | 600  | 450  | 250  | 500  | 300  | 290  | 700  | 900  |
| Частота коливань $F$ , 1/год         | 350                    | 500  | 700  | 900  | 500  | 800  | 300  | 170  | 600  | 150  | 240  | 650  | 900  | 470  | 480  | 600  | 530  | 120  | 1000 | 850  |

### Тема 3. Розрахунок несиметрії напруги

**Завдання 1.** Для споживача ЕЕ із схемою електропостачання, що на рис. 4, вирішити наступні питання.

✓ Визначити струм зворотної послідовності, що виникає при вмиканні однофазного навантаження з незмінним графіком на лінійну напругу до шин підстанції.

✓ Розрахувати опір та напругу зворотної послідовності при відомих  $S_{к.з.}$ ,  $Q_{БК}$ ,  $S_H$ .

✓ Визначити коефіцієнт несиметрії за напругою зворотної послідовності  $K_{2U}$  та з'ясувати відповідність якості ЕЕ у вузлі навантаження за даним показником. При необхідності визначитися із засобами для усунення асиметрії.

Дані, необхідні для розв'язування завдання, наведені у таблиці 3.

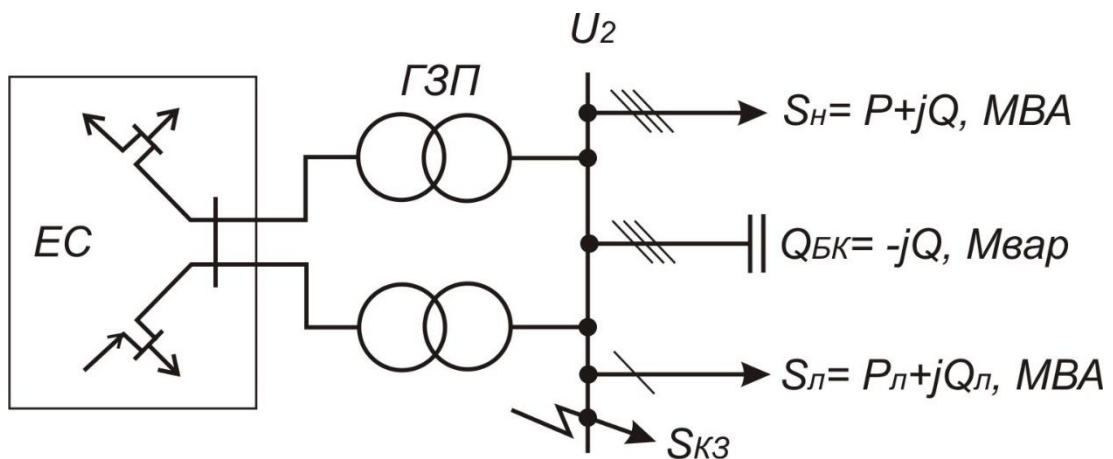


Рис. 4. Система електропостачання вузла навантаження

**Розглянемо рішення даного завдання на прикладі:**

**Вихідні дані:**

- навантаження –  $P_H = 20$  МВт,  $Q_H = 10$  Мвар;
- потужність БК  $Q_{БК} = 12$  Мвар;
- напруга мережі  $U_2 = 6$  кВ;
- міжфазне навантаження ВС –  $P_L = 7$  МВт,  $Q_L = 3$  Мвар;
- потужність  $S_{к.з.} = 190$  МВА.

**Рішення.**

Асиметрія напруги характеризується наступними показниками [1]:

- коефіцієнт асиметрії за напругою зворотної послідовності;
- коефіцієнт асиметрії за напругою нульової послідовності.

Струм зворотної послідовності для однофазного навантаження

[4]:

$$I_2 = \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \frac{S_{л}}{U_H} = \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \frac{\sqrt{7^2 + 3^2}}{6} = 731,9 \text{ А.}$$

Опір та напруга зворотної послідовності [4]:

$$z_{2\Sigma} = \frac{U_H^2}{\sqrt{4 \cdot S_H^2 + (S_{к.з.} + 2,67 \cdot S_H - Q_{бк})^2}} =$$

$$= \frac{6^2}{\sqrt{4 \cdot 22,4^2 + (190 + 2,67 \cdot 22,4 - 12)^2}} = 0,148 \text{ Ом;}$$

$$S_H = \sqrt{P_H^2 + Q_H^2} = \sqrt{20^2 + 10^2} = 22,4 \text{ МВА;}$$

$$U_2 = \sqrt{3} \cdot I_2 \cdot z_{2\Sigma} = \sqrt{3} \cdot 731,9 \cdot 0,148 = 187,4 \text{ В.}$$

Коефіцієнт несиметрії за напругою зворотної послідовності [1, 4]:

$$K_{2U} = \frac{U_2}{U_H} \cdot 100\% = \frac{187,4}{6000} \cdot 100\% = 3,12\% .$$

Згідно з ДСТУ EN 50160:2014 [1] коефіцієнт несиметрії за напругою зворотної послідовності не повинен перевищувати 2%, тобто в даному випадку є необхідність в застосуванні симетруючих пристроїв з метою усунення або зменшення несиметрії.

Наведемо розрахунок симетруючого пристрою [4].

Потужність БК двофазного симетруючого пристрою, необхідного для усунення несиметрії:

$$Q_{\Sigma} = 2\sqrt{3} \cdot K \cdot I_2 \cdot U_{H.бк} \cdot \sin(\psi_{i2} + \xi),$$

де  $K$  – відносна величина зниження несиметрії ( $K = 1$  – для зниження несиметрії до нуля);

$\psi_{i2}$  – початкова фаза  $I_2$  (за наявності міжфазного навантаження на напругу  $U_{BC}$ ).

$\varphi_H$  – кут навантаження .

$$\varphi_i = \arccos \frac{P_i}{\sqrt{P_i^2 + Q_i^2}} = \arccos \frac{20}{\sqrt{20^2 + 10^2}} = 26^\circ ;$$

$$\psi_{i2} = \arg(I_2) = \frac{\pi}{3} - \varphi_i + \frac{2\pi}{3} = 60 - 26 + 120 = 154^\circ .$$

За номограмою [4] для кута  $\psi_{i2} = 154^\circ$  (I область)  $\xi = -\pi/3$ .

$$Q_{\Sigma} = 2\sqrt{3} \cdot 731,9 \cdot 6 \cdot \sin(154 - 60) = 15,16 \text{ Мвар.}$$

За номограмою [4] визначимо розподіл потужності існуючої БК по фазам для можливості усунення асиметрії використовуючи існуюче обладнання:

$$\frac{Q_{AC}}{Q_{\Sigma}} = 0,48; \quad \frac{Q_{BC}}{Q_{\Sigma}} = 0,52;$$

$$Q_{AC} = Q_{\Sigma} \cdot 0,48 = 12 \cdot 0,48 = 5,76 \text{ Мвар};$$

$$Q_{BC} = Q_{\Sigma} \cdot 0,52 = 12 \cdot 0,52 = 6,24 \text{ Мвар}.$$

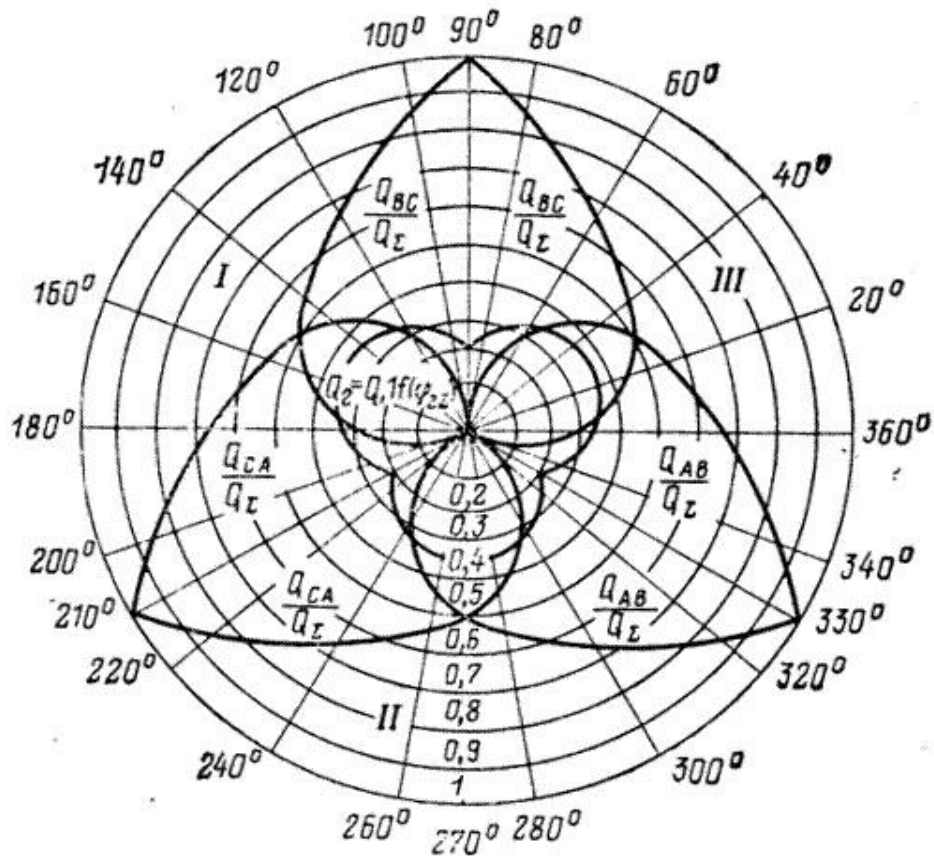


Рис.5. Номограма розподілу ємності БК по фазам

Визначимо коефіцієнт асиметрії (несиметрії) за напругою зворотної послідовності після розподілення потужності БК:

$$K_{U_{\text{ост.}}} = K_{2U} \cdot \left(1 - \frac{Q_{\Sigma}}{Q_{\Sigma}}\right) = 3,12 \cdot \left(1 - \frac{12}{15,16}\right) = 0,65\% < 2\%.$$

Отже, рівень несиметрії було знижено до допустимих за ДСТУ значень шляхом розподілення по фазах потужності існуючої БК.

Таблиця 3

| Показник                      | Номер теми та варіанта |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------------------------|------------------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                               | 3.1                    | 3.2 | 3.3  | 3.4  | 3.5  | 3.6  | 3.7  | 3.8  | 3.9  | 3.10 | 3.11 | 3.12 | 3.13 | 3.14 | 3.15 | 3.16 | 3.17 | 3.18 | 3.19 | 3.20 |
| Навантаження:                 |                        |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| $P_n$ , МВт                   | 7,0                    | 9,0 | 11,0 | 13,0 | 15,0 | 17,0 | 19,0 | 23,0 | 25,0 | 13,0 | 15,0 | 28,0 | 10,0 | 21,0 | 15,0 | 12,0 | 6,0  | 20,0 | 13,0 | 17,0 |
| $Q_n$ , Мвар                  | 3,0                    | 4   | 10,0 | 11,0 | 13,0 | 13,0 | 14,0 | 15,0 | 12,0 | 8,0  | 14,0 | 23,0 | 7,0  | 13,0 | 12,0 | 18,0 | 4,0  | 15,0 | 11,0 | 13,0 |
| Потужність БК $Q_{БК}$ , Мвар | 2,0                    | 2,0 | 5,0  | 6,0  | 8,0  | 7,0  | 9,0  | 8,0  | 10,0 | 5,0  | 5,0  | 12,0 | 5,0  | 9,0  | 10,0 | 6,0  | 2,0  | 11,0 | 7,0  | 7,0  |
| Напруга мережі $U_2$ , кВ     | 6                      | 10  | 6    | 6    | 10   | 6    | 10   | 6    | 10   | 10   | 6    | 10   | 10   | 6    | 10   | 6    | 10   | 6    | 6    | 10   |
| Міжфазне навантаження:        | АВ                     | ВС  | СА   | АВ   | ВС   | СА   | АВ   | ВС   | СА   | АВ   | АВ   | ВС   | АВ   | ВС   | СА   | СА   | ВС   | АВ   | СА   | АВ   |
| $P_l$ , МВт                   | 4,0                    | 4,0 | 8,0  | 5,0  | 6,0  | 8,0  | 5,0  | 5,0  | 6,0  | 3,0  | 7,0  | 9,0  | 3,0  | 8,0  | 5,0  | 6,0  | 2,0  | 9,0  | 5,0  | 7,0  |
| $Q_l$ , Мвар                  | 2,5                    | 1   | 3,5  | 2,0  | 3,0  | 3,0  | 2,5  | 2,0  | 4,5  | 1,5  | 3,0  | 4,0  | 1,5  | 4,0  | 2,0  | 3,0  | 1,5  | 4,0  | 3,0  | 2,0  |
| $S_{к.з.}$ , МВ·А             | 170                    | 180 | 195  | 200  | 120  | 130  | 145  | 190  | 195  | 165  | 180  | 210  | 150  | 200  | 165  | 190  | 140  | 185  | 155  | 170  |

#### Тема 4. Розрахунок коефіцієнта викривлення синусоїдальності кривої напруги

**Завдання 1.** Для споживача ЕЕ із схемою електропостачання як на рис. 6 вирішити такі питання.

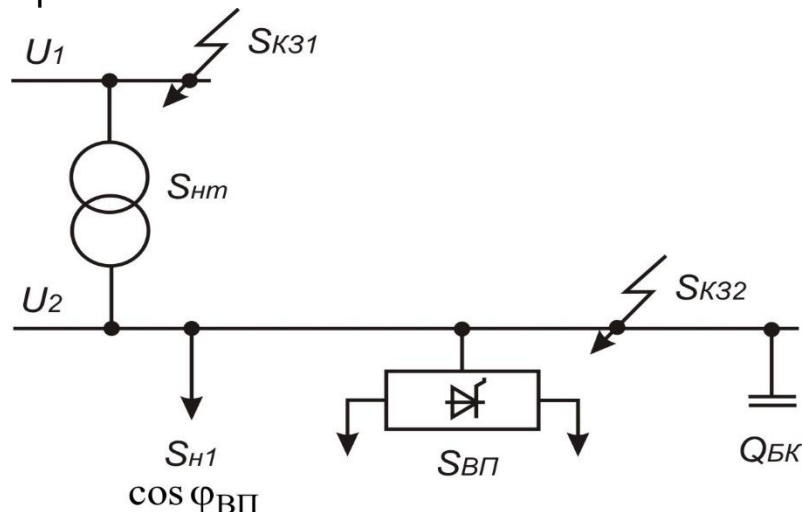


Рис. 6. Схема електропостачання з нелінійними навантаженнями

✓ Визначити припустимість підключення до шин напругою  $U_2$  з  $S_{к.з.2}$  6-фазного (12-фазного) перетворювача потужністю  $S_{ВП}$ , напругою короткого замикання в анодних трансформаторах перетворювачів  $u_{к.з} = 6,4\%$ . Допустимий вміст гармонік напруги в цьому вузлі знайти за ДСТУ EN 50160:2014.

✓ Розрахувати опір реактора для захисту батареї конденсаторів потужністю  $Q_{БК}$  та номінальною напругою  $U_{ном.БК}$ .

✓ Розрахувати струм  $n$ -ної гармоніки перетворювача  $S_{ВП}$  (див. рис. 9).

✓ Визначити індуктивність кола фільтра для погашення  $n$ -ної гармоніки, якщо його ємність дорівнює  $C_{ф}$ , Ф.

✓ Визначити коефіцієнт викривлення синусоїдальності кривої напруги.

Усі необхідні для розрахунків вихідні дані наведені у табл. 4.

**Розглянемо рішення даного завдання на прикладі:**

**Вихідні дані:**

- Потужність перетворювача  $S_{ВП} = 6,67$  МВА;
- Напряга  $U_2 = 10$  кВ;
- Потужність короткого замикання  $S_{к.з.2} = 340$  МВА;
- Потужність БК  $Q_{БК} = 4100$  квар;
- Номінальна напряга БК  $U_{ном.БК.} = 10,5$  кВ;
- Номер n-ної гармоніки  $n_{гарм} = 7$ ;
- Емність фільтра  $C_{ф,} = 2 \cdot 10^{-4}$  Ф;
- $\cos\varphi_{ВП} = 0,85$ ;
- Коефіцієнт завантаження тр-ра  $Kз = 0,6$ ;
- Фазність перетворювача – 6.

**Рішення.**

Визначаємо співвідношення між потужністю перетворювача  $S_{ВП}$  и  $S_k$  системи, щоб викривлення напруги не перевищувало допустимих значень [1]:

$$\frac{S_K}{S_{ПР}} \geq \frac{1}{U_{ВГ}} \cdot \sqrt{\frac{2\pi}{p \cdot U_{КЗ}} - 1}, \quad \text{де}$$

$S_{ПР}$  – номінальна потужність перетворювального трансформатора;

$S_{КЗ2}$  – потужність КЗ на шинах вищої напруги перетворювального трансформатора;

$U_{КЗ}$  – напряга КЗ перетворювального трансформатора;

$p$  – кількість фаз випрямлення;

$U_{ВГ}$  – діюче значення усіх вищих гармонік напруги.

Тоді

$$\frac{340}{6,67} \geq \frac{1}{0,05} \cdot \sqrt{\frac{2\pi}{6 \cdot 0,064} - 1}, \quad 50,97 < 78,37$$

Невиконання умови нерівності вказує на те, що при заданих умовах вмикання перетворювача неприпустиме.

Для запобігання перевантаження конденсаторів можливо послідовно з батареєю конденсаторів включити реактор. Крім того, захист БК реактором запобігає виникненню резонансу струмів при зміні еквівалентної реактивної провідності мережі [3]. Опір реактора розраховуємо за формулою:

$$X_p = 1,1 \cdot \frac{X_{БК}}{v^2},$$

де  $v$  – гармоніка найменшого порядку:

$$v = K \cdot p \pm 1, [5]$$

де  $K$  – номінальний ряд чисел;  $p$  - число фаз випрямляча;

$$v = K \cdot p \pm 1 = 1 \cdot 6 - 1 = 5,$$

$$X_{БК} = \frac{3 \cdot U_{ном.БК}^2}{Q_{БК}} = \frac{3 \cdot 10,5^2}{4100} = 0,081 \text{ кОм}$$

Тоді

$$X_p = 1,1 \cdot \frac{X_{БК}}{v^2} = 1,1 \cdot \frac{81}{5^2} = 3,56 \text{ Ом}$$

Визначення розрахункових гармонік струму перетворювача проводиться без урахування кута комутації. Струми гармонік до 13-го порядку визначаються за формулою [1, 3]:

$$I_v = \frac{S_{ПП}}{v \cdot \sqrt{3} \cdot U_{НОМ}} = \frac{6,67 \cdot 10^3}{7 \cdot \sqrt{3} \cdot 10} = 55,08 \text{ А.}$$

В мережах 6-10-35 кВ з джерелами вищих гармонік індуктивність реактору для захисту обирають таким чином, щоб електричне коло «реактор-батарея» мало індуктивний характер на частоті гармоніки найменшого порядку  $v_{HM}$  з амплітудного спектру джерела, згідно з виразом [4]:

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

Індуктивність фільтра:

$$L_p \geq \frac{1}{v^2 \cdot \omega^2 \cdot C_{БК}} \geq \frac{1}{7^2 \cdot 314^2 \cdot 0,0002} \geq 0,001035 \geq 1,035 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Коефіцієнт викривлення синусоїдальності кривої напруги:

$$K_U = x_{*c} \sqrt{\frac{3 \sin \varphi}{\pi(x_{*c} + x_{*ВП})} - \frac{9}{\pi^2}} \cdot 100\%,$$

$$x_{*c} = \frac{S_{ВП}}{S_{КЗ2}} = \frac{6,67}{340} = 0,02;$$

$$x_{*ВП} = \frac{u_{к.3}}{100} \frac{S_{ВП}}{S_{HT}} = \frac{6,4}{100} \frac{0,85 \cdot 6,67}{6,67} = 0,054.$$

Тоді

$$K_U = 0,02 \sqrt{\frac{3 \cdot 0,53}{3,14(0,02 + 0,054)} - \frac{9}{3,14^2}} \cdot 100\% = 4,87 \%, \text{ що менше } 5\%.$$

Таблиця 4

| Показник                                       | Номер теми та варіанта |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
|--|------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|  | 4.1                    | 4.2                | 4.3                | 4.4                | 4.5                | 4.6                | 4.7                | 4.8                | 4.9                | 4.10               | 4.11               | 4.12               | 4.13               | 4.14               | 4.15               | 4.16               | 4.17               | 4.18               | 4.19               | 4.20               |
| Потужність перетворювача $S_{ВП}$ , МВА        | 6,67                   | 5,2                | 6,67               | 5,2                | 6,67               | 5,2                | 6,67               | 5,2                | 6,67               | 6,67               | 5,2                | 6,67               | 5,2                | 6,67               | 5,2                | 6,67               | 5,2                | 6,67               | 5,2                | 6,67               |
| Напруга $U_2$ , кВ                             | 10                     | 6                  | 10                 | 6                  | 10                 | 6                  | 10                 | 6                  | 10                 | 10                 | 6                  | 10                 | 6                  | 10                 | 6                  | 10                 | 6                  | 10                 | 6                  | 10                 |
| Потужність короткого замикання $S_{кз2}$ , МВА | 250                    | 160                | 240                | 170                | 310                | 190                | 290                | 185                | 260                | 190                | 200                | 210                | 270                | 305                | 315                | 295                | 330                | 175                | 195                | 265                |
| Потужність БК $Q_{БК}$ , Мвар                  | 2,5                    | 3,1                | 4,2                | 3,7                | 2,4                | 3,8                | 3,3                | 2,8                | 2,6                | 3,9                | 3,4                | 2,5                | 3,1                | 3,7                | 2,9                | 4,1                | 2,4                | 4,2                | 3,5                | 2,3                |
| Номінальна напруга БК $U_{ном.БК}$ , кВ        | 10,5                   | 6,3                | 10,5               | 6,3                | 10,5               | 6,3                | 10,5               | 6,3                | 10,5               | 10,5               | 6,3                | 10,5               | 6,3                | 10,5               | 6,3                | 10,5               | 6,3                | 10,5               | 6,3                | 10,5               |
| Номер $n$ -ної гармоніки                       | 7                      | 5                  | 7                  | 5                  | 7                  | 5                  | 7                  | 5                  | 7                  | 7                  | 5                  | 7                  | 5                  | 7                  | 5                  | 7                  | 5                  | 7                  | 5                  | 7                  |
| Емність фільтра $C_{\phi}$ , Ф                 | $2 \times 10^{-4}$     | $2 \times 10^{-4}$ | $2 \times 10^{-4}$ | $1 \times 10^{-4}$ | $2 \times 10^{-4}$ | $1 \times 10^{-4}$ | $2 \times 10^{-4}$ | $1 \times 10^{-4}$ | $2 \times 10^{-4}$ | $2 \times 10^{-4}$ | $1 \times 10^{-4}$ | $2 \times 10^{-4}$ | $1 \times 10^{-4}$ | $2 \times 10^{-4}$ | $1 \times 10^{-4}$ | $2 \times 10^{-4}$ | $1 \times 10^{-4}$ | $2 \times 10^{-4}$ | $1 \times 10^{-4}$ | $2 \times 10^{-4}$ |
| $\cos\phi_{ВП}$                                | 0,8                    | 0,85               | 0,75               | 0,8                | 0,85               | 0,75               | 0,8                | 0,85               | 0,75               | 0,8                | 0,85               | 0,75               | 0,8                | 0,85               | 0,75               | 0,8                | 0,85               | 0,75               | 0,8                | 0,85               |
| Коефіцієнт завантаження тр-ра $K_3$            | 0,7                    | 0,65               | 0,63               | 0,64               | 0,5                | 0,58               | 0,62               | 0,65               | 0,67               | 0,61               | 0,7                | 0,65               | 0,63               | 0,64               | 0,5                | 0,58               | 0,62               | 0,6                | 0,67               | 0,61               |
| Фазність перетворювача                         | 6                      | 12                 | 6                  | 12                 | 6                  | 12                 | 6                  | 12                 | 6                  | 12                 | 6                  | 12                 | 6                  | 12                 | 6                  | 12                 | 6                  | 12                 | 6                  | 12                 |



## РЕКОМЕНДОВАНІ ДЖЕРЕЛА

1. ДСТУ EN 50160:2014. ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПРУГИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ ЗАГАЛЬНОЇ ПРИЗНАЧЕНОСТІ. Національний стандарт України. Київ. Мінекономрозвитку України. 2014.
2. Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими: за заг. ред. акад. НАН України О.В. Кириленка / Інститут електродинаміки НАН України. – К.: Ін-т електродинаміки НАН України, 2016. – 400 с.
3. Transients in Electric Power Supply Systems. Textbook for institutions of high 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.
4. Півняк Г.Г., Кириленко О.В., Азюковський О.О., Папаїка Ю.А., Луценко І.М. Перехідні процеси в системах електропостачання (шосте видання) М-во освіти і науки України, НТУ «ДП». – 6-те вид., доопрац. та допов. – Дніпро, Грані, 2024. – 712 с. ISBN 978-617-7351-87-9.
5. Кириленко О.В., Півняк Г.Г., Азюковський О.О., Папаїка Ю.А., Луценко І.М. Стійкість режиму енергосистеми з розподіленою генерацією. М-во освіти і науки України, НТУ «ДП».- Дніпро: Грані, 2024, -284 с. ISBN 978-617-7351-90-9.