

Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет "Дніпровська політехніка"



**ДНІПРОВСЬКА  
ПОЛІТЕХНІКА  
1899**

**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ  
ДО ВИКОНАННЯ ПРАКТИЧНИХ РОБІТ  
“ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ НАПРУГИ У  
СИСТЕМАХ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО  
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ”**

за навчальною дисципліною «Інтелектуальне електропостачання  
Smart Grid в системах розподіленої генерації»  
для студентів спеціальності

141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Дніпро  
2024

Папаїка Ю.А. / Методичні рекомендації до виконання практичних робіт «Дослідження показників якості напруги у системах інтелектуального електропостачання» за навчальною дисципліною “Інтелектуальне електропостачання Smart Grid у системах з розподіленою генерацією” для студентів спеціальності 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка" / Упорядн. Ю.А. Папаїка. – Д.: НТУ "ДП".– 2024.– 38 с.

Упорядники:

Ю. А. Папаїка, д.т.н., професор, завідувач кафедри електроенергетики

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
ПРОБЛЕМА ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ У ПРОМИСЛОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ.....	5
МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ЩОДО ВИКОНАННЯ КОНТРОЛЬНИХ РОБІТ.....	10
ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ КОНТРОЛЬНИХ РОБІТ.....	10
ЗАВДАННЯ.....	11
<b>Тема 1. Розрахунок відхилень напруги.....</b>	<b>11</b>
<b>Завдання 1.....</b>	<b>11</b>
<b>Завдання 2.....</b>	<b>13</b>
<b>Завдання 3.....</b>	<b>16</b>
Контрольні завдання.....	17
<b>Тема 2. Розрахунок коливань напруги.....</b>	<b>18</b>
<b>Завдання 1.....</b>	<b>18</b>
<b>Завдання 2.....</b>	<b>20</b>
Контрольні завдання.....	21
<b>Тема 3. Розрахунок несиметрії напруги.....</b>	<b>22</b>
<b>Завдання 1.....</b>	<b>22</b>
Контрольні завдання.....	24
<b>Тема 4. Розрахунок коефіцієнта викривлення синусоїдальності кривої напруги.....</b>	<b>25</b>
<b>Завдання 1.....</b>	<b>25</b>
<b>Завдання 2.....</b>	<b>28</b>
Контрольні завдання.....	35
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	36

## ВСТУП

*Мета дисципліни* – формування компетентностей з впровадження елементів інтелектуального електропостачання в умовах діючих електроенергетичних систем з розподіленою генерацією та тих, що проектуються. Реалізація мети вимагає трансформації програмних результатів навчання в дисциплінарні та адекватний відбір змісту навчальної дисципліни за цим критерієм.

В освітньо-професійній програмі Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» здійснено розподіл програмних результатів навчання за організаційними формами освітнього процесу. Зокрема, до нормативної дисципліни Ф2 «Інтелектуальне електропостачання Smart Grid у системах розподіленої генерації» віднесено такі результати навчання:

<b>РН11</b>	Аналізувати та відтворювати процеси в електроенергетичних, електротехнічних та електромеханічних комплексах та системах у тому числі при їх комп'ютерному моделюванні.
<b>РН14</b>	Враховувати правові та економічні аспекти наукові досліджень та інноваційної діяльності.
<b>РН15</b>	Дотримуватися принципів та напрямів стратегії розвитку енергетичної безпеки України.
<b>РН17</b>	Демонструвати розуміння нормативно-правових актів, норм, правил та стандартів в області електроенергетики, електротехніки та електромеханіки.

### Базові дисципліни

- Перехідні процеси в системах електропостачання.
- Електричні системи та мережі.
- Електроустаткування станцій та підстанцій.
- Електропостачання промислових підприємств та міст.
- Релейний захист та автоматика енергосистем.

Основна мета виконання практичних контрольних робіт та самостійної роботи студентів – закріплення знань, які студенти набули при вивченні дисципліни основної частини навчального плану підготовки магістра спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» та набуття практичних навичок вирішення проблем із забезпечення електромагнітної сумісності, що виникають при проектуванні та експлуатації систем електропостачання промислових об'єктів.

Мета роботи досягається шляхом розв'язування завдань щодо забезпечення якості електроенергії у споживачів.

## **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 завод (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 (СЕР) є зміна навантажень, що викликається перш за все:

- режимом роботи споживачів електроенергії;
- зміною числа споживачів;
- оперативними перемикаваннями;
- 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

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

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 КОНТРОЛЬНИХ РОБІТ

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.

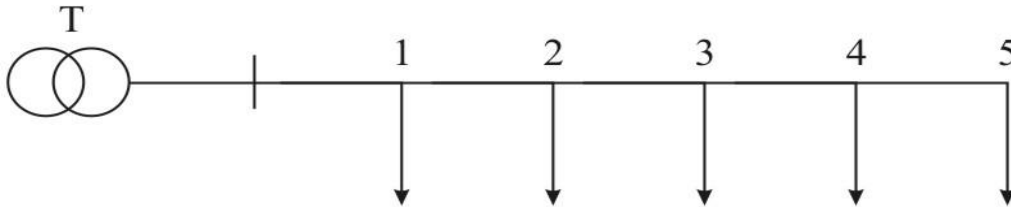


Рис. 1. Спрощена схема електричної мережі

✓ 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 ДСТ, якщо гістограма відхилень напруги в  $i$ -му вузлі за дві доби має вигляд, як на рис. 2.

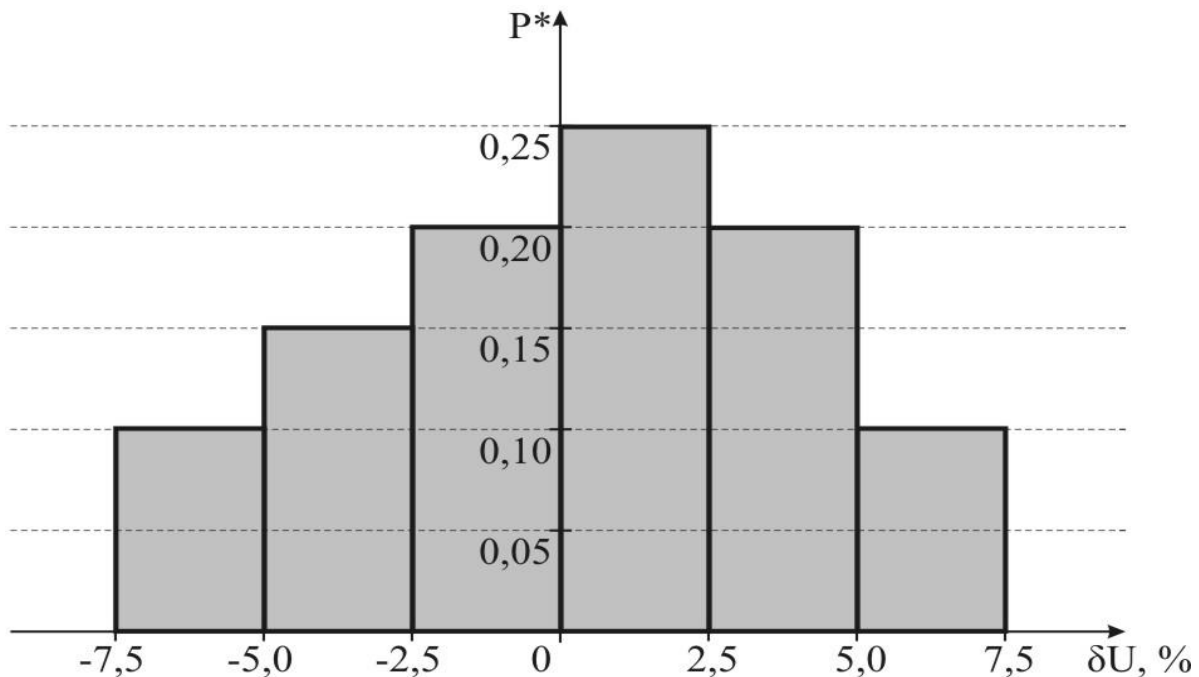


Рис. 2. Гістограма відхилень напруги

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 постачальної лінії 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 данні 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  $Q_{\text{бк}} = 332$  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:

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

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  $P_{\text{вих}}^* = 0,05$ .

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

$$\begin{aligned} E_{\text{бк}} &= \Delta U_1 - \Delta U_2; \\ \Delta U_1 &= \frac{P \cdot R + Q \cdot X_{\text{л}}}{U_i}; \quad \Delta U_2 = \frac{P \cdot R + (Q - Q_{\text{бк}}) \cdot X_{\text{л}}}{U_n}; \\ E_{\text{бк}} &= \frac{Q_{\text{бк}} \cdot X_{\text{л}}}{U_n} = \frac{332 \cdot 0,08}{0,38} = 69,9 \text{ В або} \\ E_{\text{бк}\%} &= \frac{Q_{\text{бк}} \cdot X_{\text{л}}}{10 \cdot U_n^2} = \frac{332 \cdot 0,08}{10 \cdot 0,38^2} = 18,39 \%. \end{aligned}$$

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 $i$	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 $i$ -му вузлі	216	108	324	250	200	432	240	320	400	390	410	300	255	200	160	370	350	240	115	450
Опір лінії $X_L$ , Ом, від джерела живлення до $i$ -го 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

**Завдання 2.** Для споживача електроенергії із схемою електропостачання, що на рис. 3, вирішити наступні питання.

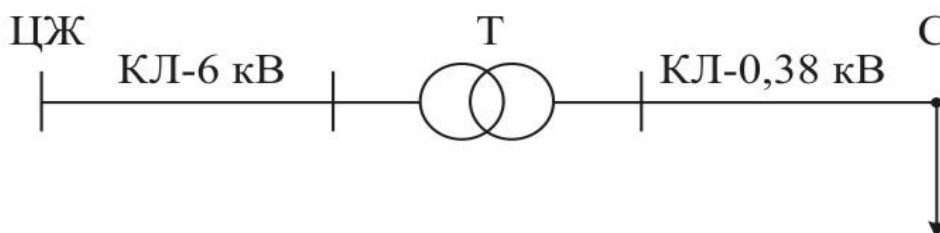


Рис. 3. Схема цехового електропостачання

✓ Визначити стандартні значення добавок напруги  $E_T$  розподільного трансформатора з пристроєм для перемикання обмоток високої напруги без збудження (ПБЗ), що має діапазон регулювання  $d, \%$ ; первинну номінальну напругу  $U_{ВН}$ , кВ, напругу холостого ходу трансформатора  $U_{2х}$ , кВ.

✓ Розрахувати фактичну та вибрати відповідну стандартну добавку напруги розподільного трансформатора (рис. 3) за даними: відхилення напруги на первинному боці трансформатора при максимальному та мінімальному навантаженні відповідно  $\delta U_T'$  та  $\delta U_T''$ , %; втрати напруги у трансформаторі в тих же режимах  $\Delta U_T'$  та  $\Delta U_T''$ , %. Бажані ступені напруги на вторинному боці трансформатора у максимальному та мінімальному режимах прийняти з класичних міркувань.

✓ Накреслити діаграму відхилень напруги для мережі, яка зображена на рис.3, та проаналізувати діапазон відхилень напруги у кінцевого споживача (вузол С) на відповідність якості електроенергії вимогам стандарту, якщо втрати напруги в живильній лінії КЛ-6 кВ у максимальному та мінімальному ре-

жимах дорівнюють  $\Delta U'_B$  і  $\Delta U''_B, \%$ , а втрати напруги у лінії низької напруги **КЛ-0,38 кВ** дорівнюють відповідно  $\Delta U'_H$  та  $\Delta U''_H, \%$ .

Дані для розв'язування завдання наведені у табл. 2.

*Розглянемо рішення даного завдання на прикладі:*

Вихідні дані:

- Діапазон регулювання  $d = \pm 2 \times 2,5 \%$  ;
- Номінальна напруга розподільного трансформатора  $U_{BH} = 10 \text{ кВ}$  ;
- Напруга холостого ходу трансформатора  $U_{2x} = 0,69 \text{ кВ}$  ;
- Відхилення напруги на первинному боці трансформатора:
  - у максимальному режимі  $\delta U'_T = 4 \%$  ;
  - у мінімальному режимі  $\delta U''_T = 3 \%$  ;
- Втрати напруги в трансформаторі:
  - у максимальному режимі  $\Delta U'_T = 3 \%$  ;
  - у мінімальному режимі  $\Delta U''_T = 2 \%$  ;
- Втрати напруги в КЛ 6-10 кВ:
  - у максимальному режимі  $\Delta U'_B = 4,5 \%$  ;
  - у мінімальному режимі  $\Delta U''_B = 1,5 \%$  ;
- Втрати напруги в КЛ-0,38-0,66 кВ:
  - у максимальному режимі  $\Delta U'_H = 3 \%$  ;
  - у мінімальному режимі  $\Delta U''_H = 2 \%$  .

*Рішення.*

Стандартні значення добавок напруги  $E_m$  трансформатора із ПБЗ з урахуванням вихідних даних визначаються за таблицею:

Номінальна напруга відгалуження, кВ	Відгалуження обмотки, %	$E_m, \%$
10,5	+5	0
10,25	+2,5	2,5
10	0	5
9,75	-2,5	7,5
9,5	-5	10

Фактична добавка може бути визначена за формулою:

$$E_{mf} = \left( \frac{U_{2x} \cdot U_{BH}}{U_{отв} \cdot U_{HH}} - 1 \right) \cdot 100 \% = \left( \frac{0,69 \cdot 10}{10 \cdot 0,66} - 1 \right) \cdot 100 \approx 4,5 \% ; [1, 16]$$

за таблицею добавка  $E_T = 5 \%$  відповідає відгалуженню  $0 \%$ .

Задаємося бажаними відхиленнями напруги на низькій стороні трансформатора у максимальному та мінімальному режимах відповідно:

$$\delta U'_{TH} = 5 \% ; \quad \delta U''_{TH} = 0 \% . \quad \text{Тоді}$$

$$E'_{T\Phi} = \delta U'_{TH} - \delta U'_T + \Delta U'_T = 5 - 4 + 3 = 4 \% ;$$

$$E''_{T\Phi} = \delta U''_{TH} - \delta U''_T + \Delta U''_T = 0 - 3 + 2 = -1 \% .$$

Знаходимо середню добавку:

$$E_{T\text{сер}} = \frac{E'_{T\Phi} + E''_{T\Phi}}{2} = \frac{4-1}{2} = 1,5\%;$$

приймаємо  $E_T = 2,5\%$  (відгалуження +2,5%).

Перераховуємо  $\delta U_{TH}$ :

$$\delta U'_{TH} = \delta U'_T - \Delta U'_T + E_T = 4 - 3 + 2,5 = 3,5\%;$$

$$\delta U''_{TH} = \delta U''_T - \Delta U''_T + E_T = 3 - 2 + 2,5 = 3,5\%.$$

Визначаємо відхилення напруги у споживача «С»:

$$\delta U'_C = \delta U'_{TH} - \Delta U'_H = 3,5 - 3 = 0,5\% ,$$

$$\delta U''_C = \delta U''_{TH} - \Delta U''_H = 3,5 - 2 = 1,5\% .$$

Якість електроенергії у споживача відповідає ДСТУ EN 50160:2014 [1], так як відхилення напруги знаходяться в нормально допустимих межах  $\pm 5\%$ .

Відхилення напруги на первинному боці трансформатора:

$$\delta U'_T = \delta U'_{TH} + \Delta U'_T - E_T = 3,5 + 3 - 2,5 = 4\% ;$$

$$\delta U''_T = 3,5 + 2 - 2,5 = 3\% ;$$

У джерела живлення:

$$\delta U'_{ЦЖ} = \delta U'_T + \Delta U'_B = 4 + 4,5 = 8,5\% ;$$

$$\delta U''_{ЦЖ} = 3 + 1,5 = 4,5\% .$$

За отриманими розрахунковими даними необхідно накреслити діаграму відхилень напруги для ділянки мережі, яка досліджується.

Таблиця 2

Показник	Номер теми та варіанту																			
	1.21	1.22	1.23	1.24	1.25	1.26	1.27	1.28	1.29	1.30	1.31	1.32	1.33	1.34	1.35	1.36	1.37	1.38	1.39	1.40
Діапазон регулювання $d, \%$	$\pm 2 \times$ $\times 2,5$	$\pm 5$	$\pm 2 \times$ $\times 2,5$	$\pm 5$	$\pm 2 \times$ $\times 2,5$	$\pm 5$	$\pm 2 \times$ $\times 2,5$	$\pm 5$	$\pm 2 \times$ $\times 2,5$	$\pm 5$	$\pm 2 \times$ $\times 2,5$	$\pm 5$	$\pm 2 \times$ $\times 2,5$	$\pm 5$	$\pm 2 \times$ $\times 2,5$	$\pm 5$	$\pm 2 \times$ $\times 2,5$	$\pm 5$	$\pm 2 \times$ $\times 2,5$	$\pm 5$
Номінальна напруга розподільного трансформатора, $U_{BH}, \text{кВ}$	10	6	10	6	10	6	10	6	10	6	10	6	10	6	10	10	6	10	6	10
Напруга холостого ходу трансформатора $U_{2x}, \text{кВ}$	0,69	0,4	0,4	0,69	0,4	0,69	0,4	0,4	0,69	0,4	0,4	0,4	0,69	0,4	0,69	0,69	0,4	0,69	0,69	0,4
Відхилення напруги на первинному боці трансформатора: у максимальному режимі $\delta U'_T, \%$	3,0	2,0	4,0	4,0	3,0	3,0	4,0	2,5	3,5	1,0	4,0	4,0	2,0	3,0	2,0	1,0	2,0	1,0	2,0	1,0
у мінімальному режимі $\delta U''_T, \%$	4,0	3,0	3,0	2,5	2,0	3,0	3,5	4,0	2,0	3,0	3,0	2,0	5,0	5,0	2,0	4,0	5,0	5,0	4,0	5,0
Втрати напруги в трансформаторі: у максимальному режимі $\Delta U'_T, \%$	3,0	4,0	3,0	3,5	5,0	4,5	3,0	4,5	4	5,0	2,5	4,5	4,0	4,0	5,0	4,5	3,5	6,0	3,0	3,0
у мінімальному режимі $\Delta U''_T, \%$	2,0	1,0	1,5	2,0	3,0	1,5	1	2,5	1,5	2,5	1,0	2,0	1,0	1,5	2,0	2,0	1,0	3,0	1,5	2,0
Втрати напруги в КЛ-6-10 кВ: у максимальному режимі $\Delta U'_B, \%$	5,0	4,0	4,5	4,0	4,0	3,0	2,0	4,0	5,0	5,0	5,0	6,0	6,0	4,5	5,0	5,0	4,0	4,0	4,5	4,0

Показник	Номер теми та варіанту																			
	1.21	1.22	1.23	1.24	1.25	1.26	1.27	1.28	1.29	1.30	1.31	1.32	1.33	1.34	1.35	1.36	1.37	1.38	1.39	1.40
у мінімальному режимі $\Delta U''_B, \%$	2,5	2	2	3,0	2,0	1	1,5	1,0	2,0	3,0	3,0	3,0	2,0	2,5	3,0	2,5	1,0	1,5	1,5	1,0
Втрати напруги в КЛ-0,38-0,66 кВ: у максимальному режимі $\Delta U'_H, \%$	4,0	5,0	3,0	3,0	5,0	2,5	3,0	3	3,5	5,0	4,0	4,0	5,0	4,0	5,0	3,5	3,0	4,0	3,0	2,0
у мінімальному режимі $\Delta U''_H, \%$	2,0	3,0	1,0	1,5	2,0	1,5	1,5	1,5	1,0	2,5	1,0	2,0	2,0	2,0	2,0	3,0	1,5	2,5	2,0	1,5

Для виконання завдань за даною темою рекомендується література [1, 2; 3; 4; 6, 16].

**Завдання 3.** Для споживача електроенергії із схемою електропостачання, що на рис. 4, вирішити наступні питання.

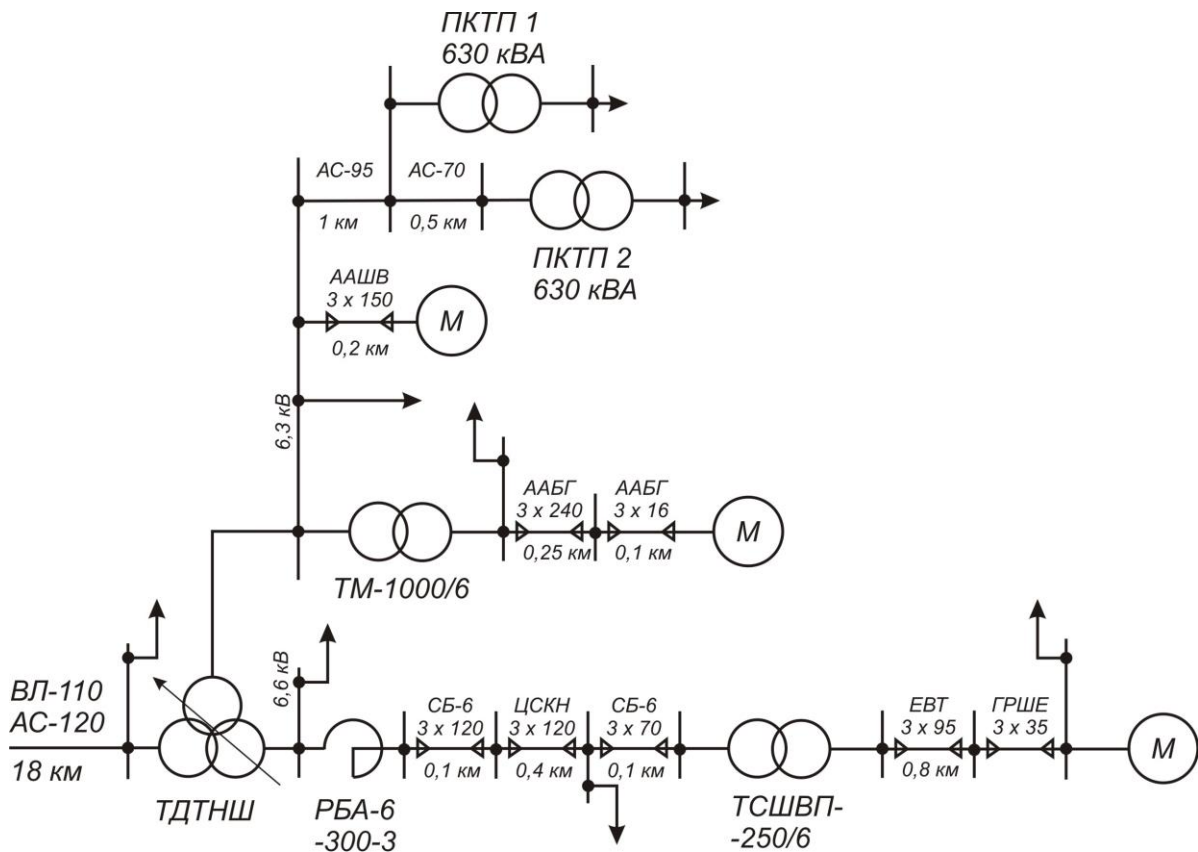


Рис. 4. Фрагмент схеми електропостачання вугільної шахти

✓ Розрахувати та надати діаграми відхилень напруги для фрагмента системи електропостачання вугледобувного підприємства (рис. 4) для трьох режимів: максимального, мінімального і післяаварійного навантаження (вимикання ВЛ-110 кВ чи трансформатор ГЗП).

✓ Вибрати добавки напруги, які необхідно здійснювати за допомогою розподільчих трансформаторів (рис. 4). Узгодити це питання з законом регулю-



вання в центрі живлення (шини РУ 6 – 10 кВ ГЗП). Оцінити достатність регулюючого діапазону у трансформаторів ГЗП, які оснащені пристроями РПН.

При розрахунках втрат напруги прийняти, що у максимальному режимі елементи СЕП мають коефіцієнт завантаження  $K_{з,макс}$ , а у мінімальному  $K_{з,мін}$  по відношенню до номінальних значень потужностей трансформаторів та по відношенню до струмів провідників, які відповідають нормованій густині струму (елементи СЕП напругою 6 кВ і більше), або тривалому току за нагрівом (елементи напругою нижче 1 кВ).

*Примітка.* В послідовно з'єднаних елементах, без проміжного відбору потужності, розраховані струми можуть відрізнятись. Однак це не помилка. Для здійснення розрахунків слід для всіх цих елементів прийняти значення струму, яке є найменшим для ланцюга, що розглядається.

Усі необхідні для розрахунків вихідні данні наведені на схемі електропостачання (рис. 4) та містяться у таблиці 3.

Таблиця 3

Показник	Номер теми та варіанту									
	1.41	1.42	1.43	1.44	1.45	1.46	1.47	1.48	1.49	1.50
Напруга в центрі живлення, кВ:										
макс. режим	127,	115	109	118	107	111	106	118	105	108
мін. режим	113	120	123	120	114	125	122	124	124	125
Потужність трансформаторів, МВ.А	2x10	2x16	2x25	2x40	2x10	2x16	2x25	2x40	2x16	2x25
Коефіцієнти завантаження:										
$K_{з,макс}$	0,8	0,65	0,82	0,7	0,73	0,68	0,75	0,7	0,8	0,79
$K_{з,мін}$	0,25	0,4	0,3	0,35	0,3	0,45	0,3	0,5	0,35	0,32

Для виконання завдань за даною темою рекомендується література [1, 2; 3; 4;5; 6, 7; 15].

### Контрольні завдання.

1. Визначити ймовірність виходу відхилень напруги за допустимі нормальні розрахункові межі  $\delta U = \pm 5,0\%$  у 2-му вузлі (рис. 1) та проаналізувати, чи буде якість ЕЕ у електроприймачів відповідати ДСТУ, якщо гістограма відхилень напруги в даному вузлі за дві доби має вигляд, як на рис. 2.

2. Розрахувати добавку, створювану батареєю конденсаторів поперечного вмикання потужністю 245 квар, напругою 0,38 кВ, підключеною до 1-го вузла (див. рис. 1), якщо опір постачальної лінії до цього вузла дорівнює 0,06 Ом.

3. Визначити стандартні значення добавок напруги розподільного трансформатора з пристроєм для перемикання обмоток високої напруги без збудження (ПБЗ), що має діапазон регулювання  $d = \pm 5,0\%$ ; первинну номінальну напругу 6 кВ, напругу холостого ходу трансформатора 0,4 кВ.

4. Накреслити діаграму відхилень напруги для мережі, яка зображена на рис.3, та проаналізувати діапазон відхилень напруги у кінцевого споживача (вузол С) на відповідність якості електроенергії вимогам стандарту, якщо: втрати напруги в живильній лінії 6 кВ у максимальному та мінімальному режимах дорівнюють 4,0% і 2,0%; втрати напруги у лінії низької напруги 0,38 кВ дорівнюють відповідно 2,5% та 1,5%; втрати напруги в трансформаторі дорівнюють відповідно 2,0% та 1,0%; відхилення напруги у джерела живлення дорівнюють відповідно 7,5% та 5,0%; стандартне значення добавки напруги трансформатора складає  $E_m = 2,5\%$ .

## Тема 2. Розрахунок коливань напруги

**Завдання 1.** Для споживача ЕЕ зі схемою електропостачання, що на рис. 5 вирішити наступні питання.

✓ Розрахувати розмахи змін напруги у точках підключення дугових сталеплавильних печей (ДСП) (рис. 5). Потужність короткого замикання  $S_{кз2}$  наведена у табл. 4.

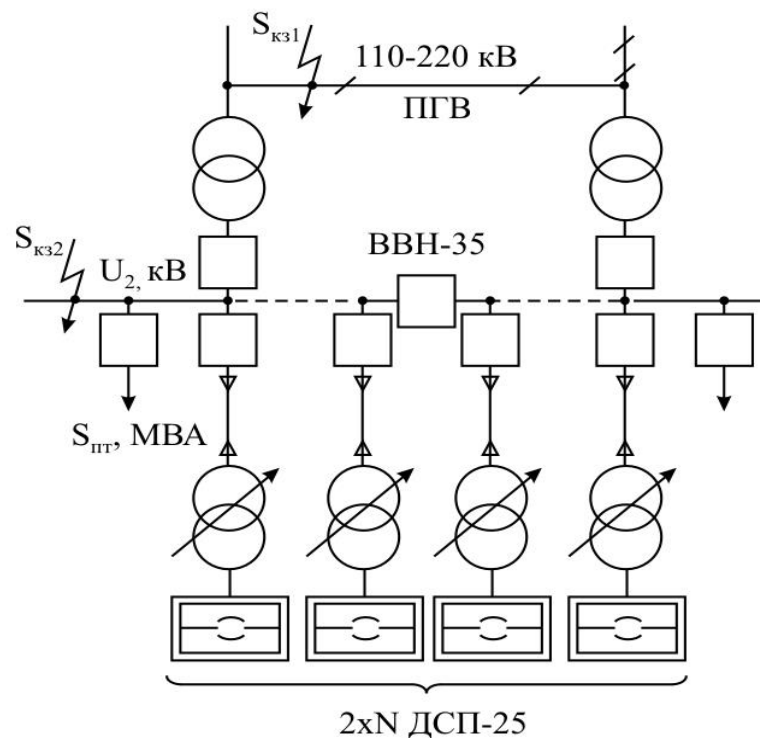


Рис. 5. Схема електропостачання потужних ДСП

✓ 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. 4. Зореве навантаження при виконанні робіт високе.

Дані, необхідні для розв'язування завдання, наведені у таблиці 4.

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  $S_i = \sqrt{\sum_{i=1}^N S_{i,\delta}^2}$  – 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.

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

Таблиця 4

Показник	Номер теми та варіанту																			
	2.51	2.52	2.53	2.54	2.55	2.56	2.57	2.58	2.59	2.60	2.61	2.62	2.63	2.64	2.65	2.66	2.67	2.68	2.69	2.70
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

**Завдання 2.** Для споживача ЕЕ із схемою електропостачання, що на рис. 6, вирішити наступні питання.

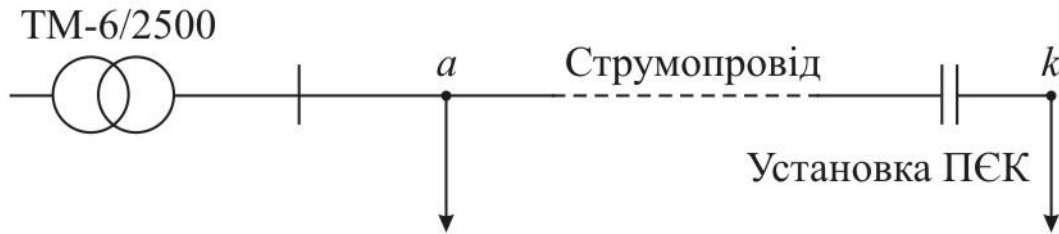


Рис. 6. Схема електричної мережі

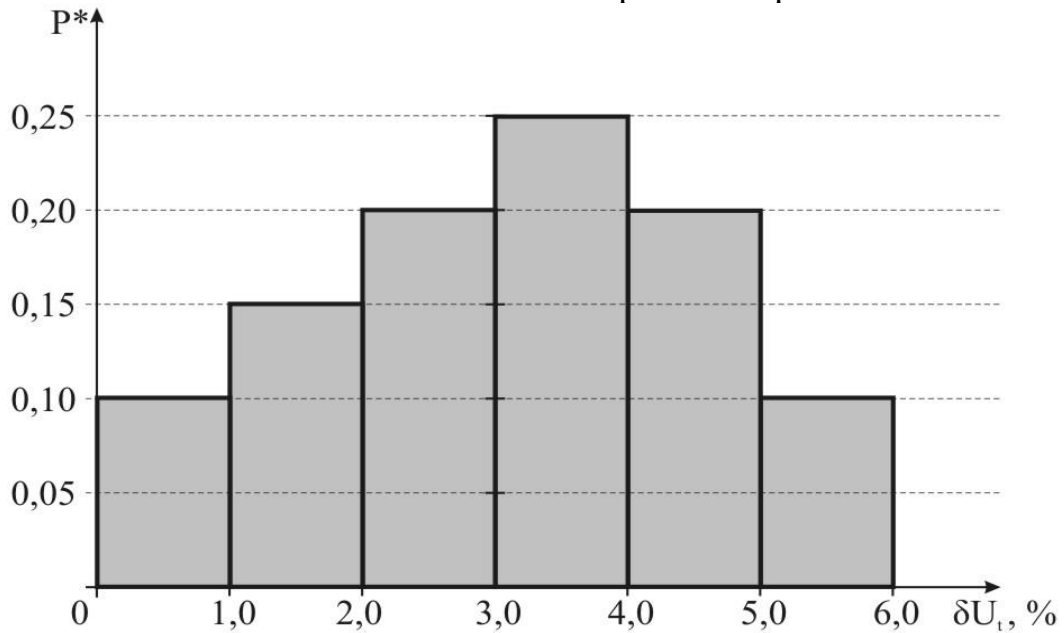


Рис. 7. Гістограма для розрахунку відхилень напруги

✓ Проаналізувати, чи відповідає ДСТУ якість ЕЕ у вузлі  $k$  (рис. 6) за показником коливань напруги, якщо гістограма за цим показником за добу має вигляд як на рис. 7. Усього за годину виникає у середньому  $m$  коливань.

✓ Визначити, яку саме надбавку за напругою необхідно утворювати за рахунок підключення установки ПЕК, щоб нормалізувати якість ЕЕ у вузлі  $k$ .

Усі необхідні для розрахунків вихідні дані наведені на гістограмі (рис.7) та у табл. 5.

Розглянемо рішення даного завдання на прикладі:

Вихідні дані:

- Частота коливань:  $F = 300$  1/год.

Рішення.

Так як до вузла підключені силові електроприймачі, то допустиме значення розмаху зміни напруги визначаємо за кривою 1 ДСТУ EN 50160:2014 [1] (додаток – рис. 3).

$$\text{При } F = 300 \frac{1}{\text{год.}} = \frac{300}{60} = 5 \frac{1}{\text{хв.}} \quad \delta U_{\text{доп}} = 2,3 \%$$

Ймовірність виходу коливань напруги за допустимі межі за гістограмою (рис. 7):

$$P_{\text{вих}} = 0,2 + 0,25 + 0,2 + 0,1 = 0,75, \text{ тобто } 75\%.$$

Якість електроенергії не відповідає ДСТ, так як протягом доби  $\delta U_t$  не допускається вихід за допустимі значення (тобто  $P_{\text{вих}} = 0$ ).

При ввімкненні конденсаторів у розтин лінії (установка ПЕК – продольно-емнісна компенсація) реактивний опір  $x_L$  и  $z_L$  зменшується [3, 6]:

$$x_L - x_C < x_L ;$$

$$z_L = \sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2} < \sqrt{r^2 + x_L^2} .$$

Зменшується також втрата напруги у лінії:

$$\Delta U_1 = r \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n + (x_L - x_C) \cdot I_n \cdot \sin \varphi_n < \Delta U_2 = r \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n + x_L \cdot I_n \cdot \sin \varphi_n,$$

де  $I_n$  - струм навантаження лінії;  $\varphi_n$  - фазовий кут навантаження.

Опір БК для зниження втрати напруги від  $\Delta U_1$  до  $\Delta U_2$ :

$$x_{БК} = \frac{U_{\text{ном.БК}} \cdot (\Delta U_1 - \Delta U_2)}{\sqrt{3} \cdot I_n \cdot i_n \cdot \sin \varphi_n},$$

где  $i_n$  - кратність пікового струму навантаження по відношенню до номінального.

Реактивна потужність БК:

$$Q_{БК} = \frac{U_{\text{ном.БК}}^2}{x_{БК}}.$$

Таблиця 5

Показник	Номер теми та варіанта																			
	2.71	2.72	2.73	2.74	2.75	2.76	2.77	2.78	2.79	2.80	2.81	2.82	2.83	2.84	2.85	2.86	2.87	2.88	2.89	2.90
Частота коливань $F$ , 1/год	440	520	320	540	430	800	440	380	400	350	550	220	460	680	510	830	360	480	950	280

Для виконання завдань рекомендується література [3; 7; 8, 9, 10, 11, 15].

### Контрольні завдання.

1. Розрахувати розмахи змін напруги у точках підключення чотирьох дугових сталеплавильних печей (ДСП) потужністю 25 МВА кожна (рис. 5), потужність короткого замикання напругою 6 кВ складає 305 МВА.

2. Визначити допустиме значення розмаху коливань напруги для силових електроприймачів, якщо періодична частота коливань напруги складає 480 1/год.

3. Визначити, чи відповідає ДСТ якість ЕЕ у вузлі  $k$  (рис. 6) за показником коливань напруги, якщо гістограма за цим показником за добу має вигляд як на рис. 7, при цьому за годину виникає у середньому 240 коливань.

### Тема 3. Розрахунок несиметрії напруги

**Завдання 1.** Для споживача ЕЕ із схемою електропостачання, що на рис. 8, 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  $S_{к.з.}$ ,  $Q_{БК}$ ,  $S_n$ .

✓ 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 6.

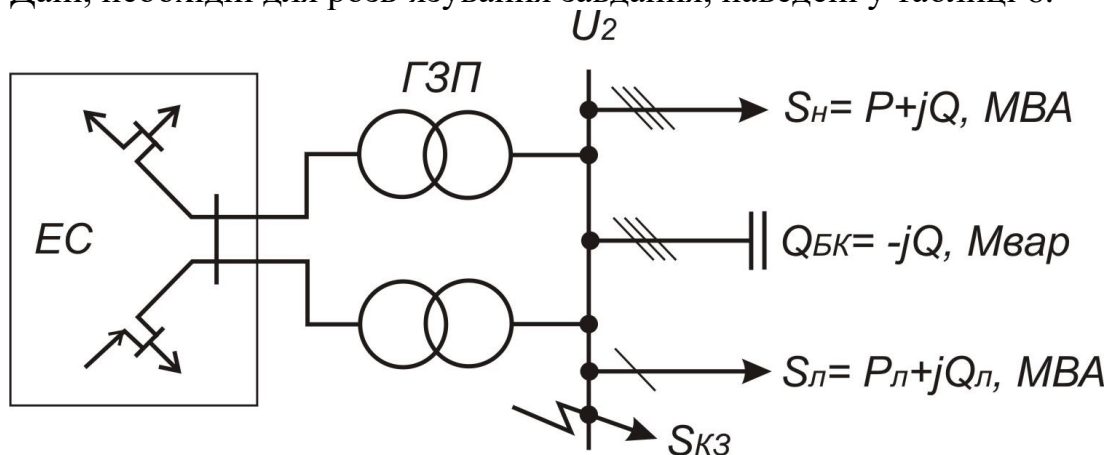


Рис. 8. Система електропостачання вузла навантаження

Розглянемо рішення даного завдання на прикладі:

Вихідні дані:

- навантаження –  $P_n = 20$  МВт,  $Q_n = 10$  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 [15]:

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

Опір та напруга зворотної послідовності [15]:

$$z_{2\Sigma} = \frac{U_i^2}{\sqrt{4 \cdot S_i^2 + (S_{\hat{e},\zeta} + 2,67 \cdot S_i - Q_{\hat{a}\hat{e}})^2}} =$$

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

$$S_i = \sqrt{P_i^2 + Q_i^2} = \sqrt{20^2 + 10^2} = 22,4 \text{ МВА;}$$

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

Коефіцієнт несиметрії за напругою зворотної послідовності [1, 15]:

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

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 [15].

Потужність БК двофазного симетруючого пристрою, необхідного для усунення несиметрії:

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

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  $U_{BC}$ ).

$\varphi_n$  – 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 [15] 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 [15] визначимо розподіл потужності існуючої БК по фазам для можливості усунення асиметрії використовуючи існуюче обладнання:

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

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

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

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

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

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

Таблиця 6

Показник	Номер теми та варіанта																			
	3.91	3.92	3.93	3.94	3.95	3.96	3.97	3.98	3.99	3.100	3.101	3.102	3.103	3.104	3.105	3.106	3.107	3.108	3.109	3.110
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: $P_L$ , МВт	AB	BC	CA	AB	BC	CA	AB	BC	CA	AB	AB	BC	AB	BC	CA	CA	BC	AB	CA	AB
$Q_L$ , Мвар	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
$S_{к.з.}$ , МВ·А	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
	170	180	195	200	120	130	145	190	195	165	180	210	150	200	165	190	140	185	155	170

Для виконання завдання рекомендується література [7; 8, 9, 11, 16].

### Контрольні завдання.

1. Визначити струм зворотної послідовності, який виникає при вмиканні однофазного струмоприймача потужністю  $S_L = 7 + j5$  МВА з незмінним графіком на лінійну напругу  $U_{AB} = 10$  кВ до шин підстанції (рис. 8).

2. Визначити опір зворотної послідовності при наступних даних (рис. 8): потужність к. з. складає 265 МВА; потужність БК - 9 Мвар; потужність трифазного навантаження -  $S_H = 17 + j15$  МВА.

3. Визначити напругу зворотної послідовності та коефіцієнт несиметрії за напругою зворотної послідовності при наступних даних: струм зворотної послідовності складає 650 А; опір зворотної послідовності – 0,15 Ом; напруга на шинах підстанції – 6 кВ.



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

**Завдання 1.** Для споживача ЕЕ із схемою електропостачання як на рис. 9 вирішити такі питання.

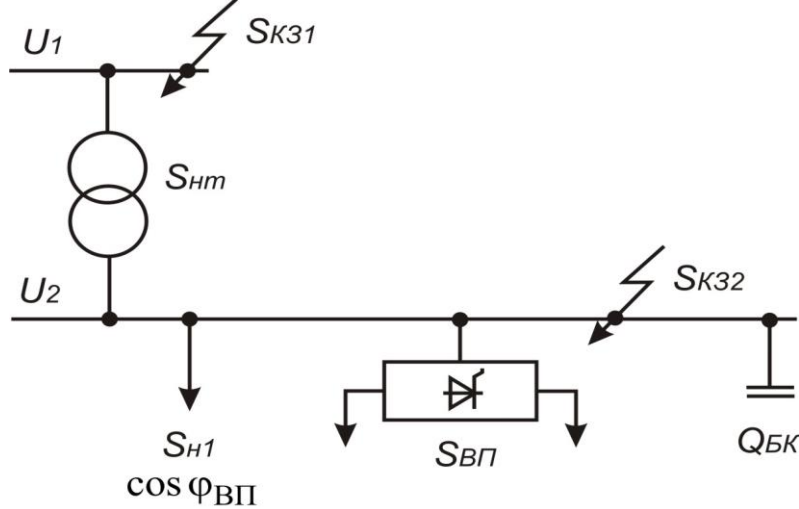


Рис. 9. Схема електропостачання з нелінійними навантаженнями

- ✓ 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  $C_{\phi}$ , Ф.
- ✓ Визначити коефіцієнт викривлення синусоїдальності кривої напруги.

Усі необхідні для розрахунків вихідні дані наведені у табл. 7.

Розглянемо рішення даного завдання на прикладі:

Вихідні дані:

- Потужність перетворювача  $S_{ВП} = 6,67$  МВА;
- Напруга  $U_2 = 10$  кВ;
- Потужність короткого замикання  $S_{к.з.2} = 340$  МВА;
- Потужність БК  $Q_{БК} = 4100$  квар;
- Номінальна напруга БК  $U_{ном.БК} = 10,5$  кВ;
- Номер n-ної гармоніки  $n_{гарм} = 7$ ;
- Емність фільтра  $C_{\phi} = 2 \cdot 10^{-4}$  Ф;
- $\cos\phi_{ВП} = 0,85$ ;
- Коефіцієнт завантаження тр-ра  $K_3 = 0,6$ ;
- Фазність перетворювача – б.

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;

$U_{КЗ}$  – напруга 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:

$$v = K \cdot p \pm 1, [15]$$

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]:

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

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  $v_{\text{НМ}}$  з амплітудного спектру джерела, згідно з виразом [10]:

$$v_{\text{НМ}} \cdot \omega \cdot L_P \geq \frac{1}{v_{\text{НМ}} \cdot \omega \cdot C_{\text{БК}}}.$$

Індуктивність фільтра:

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

Коефіцієнт викривлення синусоїдальності кривої напруги:

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

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

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

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 7

Показник	Номер теми та варіанта																			
	4.111	4.112	4.113	4.114	4.115	4.116	4.117	4.118	4.119	4.120	4.121	4.122	4.123	4.124	4.125	4.126	4.127	4.128	4.129	4.130
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
Ємність 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 $K_z$	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

**Завдання 2.** Для споживача ЕЕ із схемою електропостачання як на рис. 10 вирішити такі питання.

✓ Розрахувати напругу та струм  $n$ -ної гармоніки і коефіцієнт несинусоїдальності.

✓ Вибрати силові резонансні фільтри (СРФ) для підстанції промислового підприємства з напругою  $U_2$  на шинах (рис. 10).

✓ Вибрати та обґрунтувати схему фільтрів.

Усі необхідні для розрахунків данні наведенні у таблиці 8.

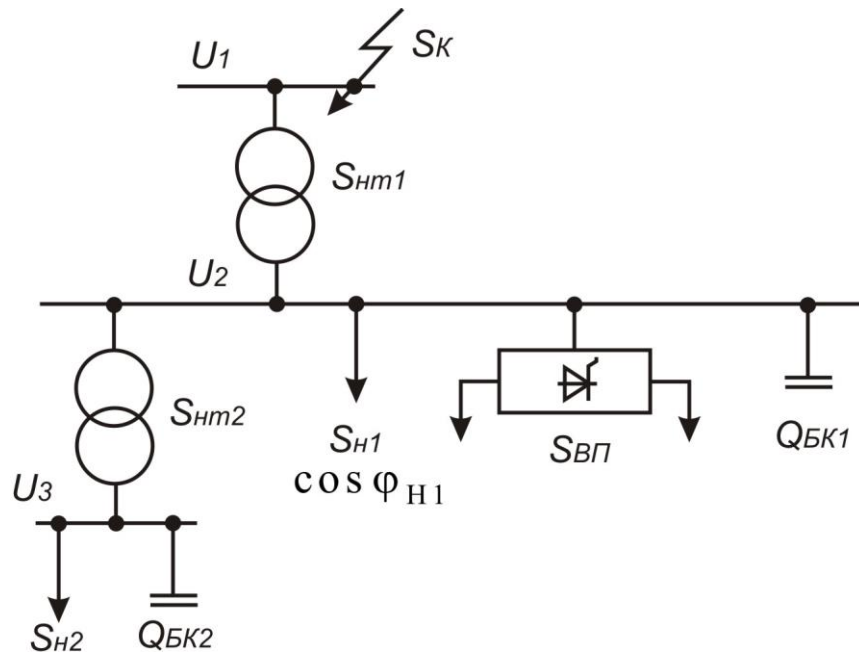


Рис. 10. Схема електричної мережі з нелінійним навантаженням

Таблиця 8

Показник	Номер теми та варіанту									
	4.131	4.132	4.133	4.134	4.135	4.136	4.137	4.138	4.139	4.140
$S_K$ , МВА	800	2200	2500	3100	2000	1000	1800	2400	3700	900
$U_1$ , кВ	35	110	150	150	110	35	110	150	150	35
$S_{н.м1}$ , МВА	16	25	40	63	32	16	40	32	40	16
$U_2$ , кВ	6	10	10	10	6	6	10	10	10	10
$S_{н1}$ , МВА	6,0	14,0	16,0	25,0	11,0	9,0	15,0	10,0	17,0	7,0
$\cos \varphi_{н1}$	0,8	0,75	0,75	0,8	0,8	0,75	0,8	0,8	0,8	0,75
$S_{ВП}$ , МВА	5	6	9	15	12	6	7	8	8	4
$\varphi_{вп}$ , град.	10	15	15	20	15	10	15	10	15	10
Фазність перетворювача $P$	6	6	12	12	12	6	6	6	12	6
$Q_{БК1}$ , Мвар	2,9	6,0	7,0	9,0	4,0	4,0	6,0	7,0	8,0	2,2
$S_{н.м2}$ , МВА	1,0	1,0	1,6	2,5	1,6	1,6	4,0	2,5	1,6	1,0
$K_{з.м2}$	0,75	0,8	0,8	0,8	0,8	0,75	0,75	0,75	0,8	0,8
$Q_{БК2}$ , Мвар	0,4	0,6	0,7	0,9	0,6	0,6	0,9	0,9	0,7	0,5

Для виконання завдання рекомендується література [6, 7; 10, 11, 12; 13].

*Примітка.* Основні умови вибору силових резонансних фільтрів (СРФ) вищих гармонік наведені нижче [15].

Коефіцієнт викривлення синусоїдальності кривої напруги:

$$K_U = \left( \sqrt{\sum_{v=2}^n \frac{U_v^2}{U_{НОМ}^2}} \right) \cdot 100,$$

де  $U_v$  – напруга  $v$ -ї гармоніки, кВ;

$n$  – номер останньої гармоніки, що враховується у розрахунках.

Потужність БК-фільтру (на фазу) визначають за виразом:

$$Q_p \geq 1,2 K_C U_{н.б} I_{v\Sigma},$$

де  $U_{н.б}$  – номінальна напруга БК (батареї конденсаторів);

$I_{v\Sigma}$  – діюче значення гармонік струму, що протікають через фільтр  $v$ -ї гармоніки;

$K_C$  – коефіцієнт, що залежить від схеми з'єднання конденсаторів.

Потужність батареї за умови ефективності поглинання струму гармоніки:

$$Q'_{БК} = K_p S_{к,макс} \cdot 10^3,$$

де  $S_{к,макс}$  – максимальна потужність трифазного короткого замикання на даній секції.

Коефіцієнт збільшення напруги основної частоти на батареї за рахунок послідовно включеного реактору:

$$\alpha = \frac{v^2}{v^2 - 1}.$$

Компенсуюча спроможність фільтру:

$$Q_{1\phi} = Q_{н.ф} C_{U1}^2,$$

де  $Q_{н.ф}$  – прийнята потужність батареї фільтру (найбільше зі значень);

$C_{U1}$  – коефіцієнт завантаження батареї за напругою основної частоти.

Номінальний струм батареї фільтру:

$$I_{н.ф} = \frac{Q_{н.ф}}{3U_{н.б}}.$$

Характеристичний опір фільтру:

$$\rho = \frac{3U_{н.б}^2}{Q_{н.ф} \cdot v} \cdot 10^3.$$

Реактивний опір реактора на основній частоті:

$$X_{1p} = \frac{\rho}{v}.$$

Номінальний струм реактора фільтру:

$$I_{н.р} \geq 1,3 I_{н.ф}.$$

Номінальна напруга реактора фільтру:

$$U_{н.р} \geq U_{р.мах}$$

де  $U_{р.мах}$  – максимальна повна напруга на реакторі фільтру.

Необхідно також виконати перевірки правильності вибору батарей конденсаторів фільтрів та реактора, а також визначити ефективність фільтру. Вся необхідна для цього додаткова інформація знаходиться в рекомендованій літературі.

*Розглянемо рішення даного завдання на прикладі:*

Вихідні дані:

- $S_k = 1700$  МВА;                      -  $\varphi_{en} = 12^\circ$ ;
- $U_1 = 110$  кВ;                         -  $p = 6$ ;
- $S_{нм1} = 25$  МВА;                       $Q_{БК1} = 5$  Мвар;
- $U_2 = 6$  кВ;                             -  $S_{н.м2} = 1$  МВА;
- $S_{н1} = 12$  МВА;                       -  $K_{з.м2} = 0,8$ ;
- $\cos \varphi_{н1} = 0,8$ ;                       -  $Q_{БК2} = 0,4$  Мвар.
- $S_{en} = 6,1$  МВА;

*Рішення.*

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

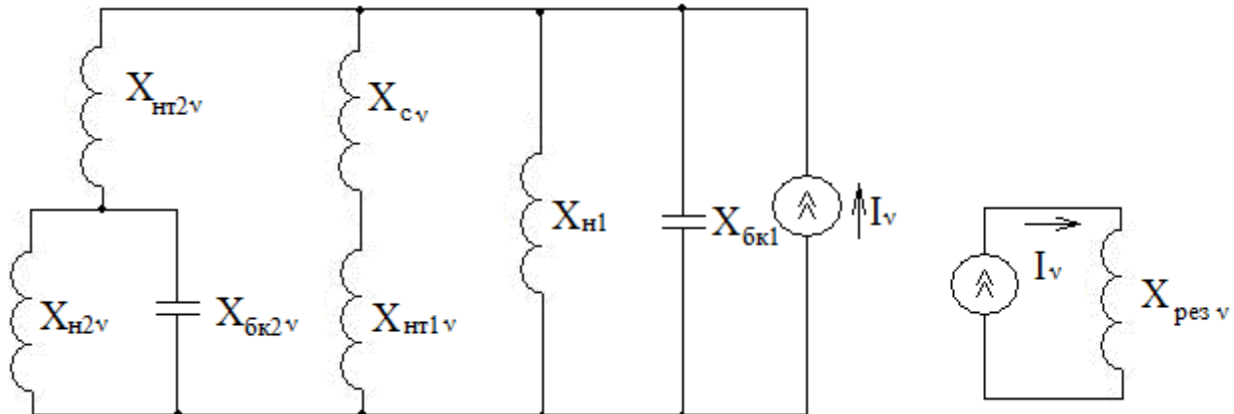


Рис. 11. Схема заміщення електричної мережі з нелінійним навантаженням (рис. 10)

Номера гармонік, що генеруються перетворювачем, визначаємо за формулою:  
 $v = kp \pm 1$ , де  $k = 1, 2, 3$ .

Для 6-фазного перетворювача ( $p = 6$ ) номери гармонік, що генеруються будуть:  
 $v = 5, 7, 11, 13, 17, 19$ .

Опори  $v$ -тої гармоніки кожного елемента розраховуються за формулами:

- енергосистема:

$$x_{cv} = \frac{U_2^2}{S_k} \cdot v = \frac{6^2}{1700} \cdot v = 0,021v \text{ Ом};$$

- двообмотковий трансформатор:

$$x_{нм1v} = \frac{12v}{S_{нм1}} = \frac{12}{25} v = 0,48v \text{ Ом};$$

$$x_{нм2} = \frac{12v}{S_{нм2}} = \frac{12}{1} v = 12v \text{ Ом};$$

- батареї конденсаторів:

$$x_{BK1\nu} = \frac{40}{Q_{BK1} \cdot \nu} = \frac{40}{5000 \cdot \nu} = \frac{0,008}{\nu} \text{ Ом};$$

$$x_{BK2\nu} = \frac{40}{Q_{BK2}} = \frac{40}{400\nu} = \frac{0,1}{\nu} \text{ Ом};$$

- навантаження:

$$x_{H1} = \frac{12\nu}{S_{H1}} = \frac{12}{12} \cdot \nu \text{ Ом};$$

$$x_{H2} = \frac{12\nu}{S_{H2}} = \frac{12\nu}{S_{H2} \cdot K_{зм2}} = \frac{12\nu}{1 \cdot 0,8} = 15\nu \text{ Ом}.$$

Еквівалентний опір схеми заміщення:

$$x_{рез\nu} = (X_{H1\nu}^{-1} - X_{BK1\nu}^{-1} + (X_{cv} + X_{HT1\nu})^{-1} + (X_{HT2} + \frac{X_{H2\nu} \cdot X_{BK2\nu}}{X_{H2\nu} - X_{BK2\nu}})^{-1})^{-1}$$

Розрахункові гармоніки струму перетворювача:

$$I_{vBП} = \frac{S_{BП}}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \nu} = \frac{6100}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot \nu} = 587/\nu \text{ А}.$$

Напряга  $\nu$ -тої гармоніки на секціях шин 6 кВ:

$$U_{\nu} = I_{vBП} \cdot X_{рез\nu}.$$

Розраховуємо значення опорів елементів схеми, гармоніки струму та напруги для  $\nu = 5, 7, 11, 13, 17, 19$  та результати розрахунків заносимо в таблицю 9.

Таблиця 9

$\nu$	$x_{cv}$ Ом	$x_{hm1\nu}$ Ом	$x_{hm2\nu}$ Ом	$x_{BK1\nu}$ Ом	$x_{BK2\nu}$ Ом	$x_{H1\nu}$ Ом	$x_{H2\nu}$ Ом	$x_{рез\nu}$ Ом	$I_{vBП}$ А	$U_{\nu}$ В
5	0,105	2,4	60	$1,6 \cdot 10^{-3}$	0,02	5	75	0,0016	117,4	0,188
7	0,147	3,36	84	$1,14 \cdot 10^{-3}$	0,014	7	105	0,00114	83,86	0,096
11	0,231	5,28	132	$0,73 \cdot 10^{-3}$	0,009	11	165	$0,73 \cdot 10^{-3}$	53,36	0,039
13	0,273	6,24	156	$0,62 \cdot 10^{-3}$	0,0077	13	195	$0,62 \cdot 10^{-3}$	45,15	0,028
17	0,357	8,16	204	$0,47 \cdot 10^{-3}$	0,0059	17	255	$0,47 \cdot 10^{-3}$	34,53	0,016
19	0,399	9,12	228	$0,42 \cdot 10^{-3}$	0,0052	19	285	$0,42 \cdot 10^{-3}$	30,89	0,013

Коефіцієнт викривлення синусоїдальності кривої напруги [15]:

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum U_{\nu}^2}}{U_H} \cdot 100\% = \frac{\sqrt{0,188^2 + 0,096^2 + 0,039^2 + 0,028^2 + 0,016^2 + 0,013^2}}{6000} =$$

$$= 0,0036\% < 5\%,$$

що відповідає вимогам ДСТУ EN 50160:2014.

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

В мережах з шестифазними вентиляними перетворювачами достатньо установити тільки СРФ 5-й та 7-й гармоніки.

Для мереж напругою 6 кВ доцільна схема з'єднання конденсаторів у трикутник.



**Виконаємо розрахунок фільтрів вищих гармонік.**

Вибір батарей конденсаторів для фільтрів:

1. Орієнтовна потужність батарей конденсаторів фільтрів, що визначається струмом гармоніки:

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

$$Q_{05} = \sqrt{3} \cdot 1,3 \cdot 6 \cdot 117,4 = 1586 \text{ квар};$$

$$Q_{07} = \sqrt{3} \cdot 1,3 \cdot 6 \cdot 83,86 = 1133 \text{ квар};$$

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

$$Q_{бк} \geq S_k \cdot K_p; K_p = 0,45 \cdot 10^{-2};$$

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

$$Q_{015} = 7650 \text{ квар};$$

$$Q_{017} = 170000 \cdot 0,45 \cdot 10^{-2} = 7650 \text{ квар}.$$

3. Прийняти потужність БК:  $Q_{П5} = 7650$  квар;  $Q_{П7} = 7650$  квар.

4. Коефіцієнт ефективності поглинання гармоніки для прийнятої батареї конденсаторів:

$$K_p = \frac{Q_{П}}{S_k};$$

$$K_{p5} = \frac{7650}{1700000} = 0,45 \cdot 10^{-2}; \quad K_{p7} = 0,45 \cdot 10^{-2}.$$

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

$$\alpha_p = \frac{v^2}{v^2 - 1};$$

$$\alpha_{p5} = \frac{5}{5^2 - 1} = 1,048, \quad \alpha_{p7} = \frac{7^2}{7^2 - 1} = 1,021.$$

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

$$K_n = \frac{V_2}{\sqrt{3} \cdot V_{н.б.}};$$

$$K_n = \frac{6}{\sqrt{3} \cdot 6,6} = 0,525.$$

7. Перевірка батарей конденсаторів на відсутність перенапруг в усталеному режимі:

$$\alpha_p K_n \leq 1$$

$$\alpha_{p5} \cdot K_n = 1,042 \cdot 0,525 = 0,547 < 1$$

$$\alpha_{p7} \cdot K_n = 1,021 \cdot 0,525 = 0,536 < 1$$

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

$$\eta_v = \frac{\alpha}{K_1 \cdot K_p \cdot v^2};$$

$$K_l = 1, \alpha = -0,02 \text{ – для 5-ої та 7-ої гармоніки};$$

$$\eta_5 = \frac{-0,02}{0,45 \cdot 10^{-2} \cdot 5^2} = -0,178;$$

$$\eta_7 = \frac{-0,02}{0,45 \cdot 10^{-2} \cdot 7^2} = -0,09.$$

9. Визначення коефіцієнта завантаження по струму  $v$ -ої гармоніки:

$$K_{iv} = \frac{1}{1 + \eta_v};$$

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

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

10. Перевірка потужності батарей конденсаторів за умовою виключення перевантаження по струму:

$$Q_n = \frac{3 \cdot V_{н.б} \cdot I_v \cdot K_{iv}}{1,6 - (\alpha_p \cdot K_n)^2}$$

$$Q_{n5} = \frac{3 \cdot 6,6 \cdot 117,4 \cdot 1,22}{1,6 - (1,042 \cdot 0,525)^2} = 2180 \text{ квар};$$

$$Q_{n7} = \frac{3 \cdot 6,6 \cdot 83,86 \cdot 1,1}{1,6 - (1,021 \cdot 0,525)^2} = 1391,4 \text{ квар}.$$

11. Реактивна потужність, яка видається батареями конденсаторів фільтрів:

$$Q_{вид} = Q_n \cdot (\alpha_p \cdot K_n)^2;$$

$$Q_{вид} = 7650 \cdot (1,042 \cdot 0,525)^2 = 2289 \text{ квар};$$

$$Q_{вид} = 7650 \cdot (1,021 \cdot 0,525)^2 = 2198 \text{ квар}.$$

Сумарна потужність 4487 квар.

### **Вибір реакторів фільтрів**

12. Визначення ємнісного опору фази батарей конденсаторів:

$$X_{cv} = \frac{3 \cdot V_{н.б}^2}{Q_n};$$

$$X_{c5} = \frac{3 \cdot 6,6^2 \cdot 10^3}{7650} = 17,1 \text{ Ом};$$

$$X_{c7} = \frac{3 \cdot 6,6^2 \cdot 10^3}{7650} = 17,1 \text{ Ом}.$$

13. Визначення індуктивного опору реактора, виходячи з умов резонансу:

$$X_{pv} = \frac{X_{cv}}{v^2};$$

$$X_{p5} = \frac{17,1}{5^2} = 0,684 \text{ Ом};$$

$$X_{p7} = \frac{17,1}{7^2} = 0,35 \text{ Ом.}$$

14. Номінальний струм реактора:

$$I_{p.n} = \frac{Q_n}{\sqrt{3} \cdot V_2};$$

$$I_{p.n5} = \frac{7650}{\sqrt{3} \cdot 6} = 736 \text{ А;}$$

$$I_{p.n7} = \frac{7650}{\sqrt{3} \cdot 6} = 736 \text{ А.}$$

15. Реактивність реактора:

$$X_p = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{p.n} \cdot X_{pv}}{10 \cdot V_{p.n}};$$

$$X_{p5} = \frac{\sqrt{3} \cdot 750 \cdot 0,684}{10 \cdot 6} = 14,8\%; \quad X_{p7} = \frac{\sqrt{3} \cdot 750 \cdot 0,35}{10 \cdot 6} = 7,58\%.$$

16. Процент гармонік напруги в мережі після встановлення фільтру:

$$V_{vcp} = V_v \cdot \eta_v$$

$$V_{5cp} = 0,188 \cdot 0,178 = 0,033 \text{ В;}$$

$$V_{7cp} = 0,096 \cdot 0,09 = 0,0086 \text{ В.}$$

Коефіцієнт викривлення синусоїдальності після встановлення фільтрів:

$$K_U = \frac{\sqrt{V_{5cp}^2 + V_{7cp}^2}}{V_2} = \frac{0,033^2 + 0,0086^2}{6000} \cdot 100\% = 5,7 \cdot 10^{-4}.$$

### Контрольні завдання.

1. Визначити припустимість підключення до шин напругою  $U_2 = 6 \text{ кВ}$  з потужністю к. з. на цих шинах 250 МВА 6-фазного перетворювача потужністю 6,675 МВА, напругою к. з. анодного трансформатора перетворювача - 8%. Допустимий вміст гармонік напруги в цьому вузлі знайти за ДСТУ.

2. Розрахувати струм 5-ої гармоніки перетворювача, потужність якого 6,675 МВА; напругою  $U_2 = 10 \text{ кВ}$ .

3. Визначити індуктивність кола фільтра для погашення 7-ої гармоніки, якщо його ємність дорівнює  $10^{-4} \text{ Ф}$ .

4. Визначити коефіцієнт викривлення синусоїдальності кривої напруги на шинах напругою  $U_2 = 10 \text{ кВ}$  підстанції з потужністю к. з. на цих шинах 290 МВА, при підключенні 6-фазного перетворювача потужністю 6,675 МВА, напругою к. з. анодного трансформатора перетворювача – 6,4%; завантаження анодного трансформатора перетворювача складає 70%.

5. Розрахувати опір реактора для захисту батареї конденсаторів потужністю 3,5 Мвар та номінальною напругою 6 кВ.

6. Підібрати промисловий тип реактора для захисту батареї конденсаторів потужністю 5,2 Мвар та номінальною напругою 10 кВ, розрахункове значення індуктивного опору реактора дорівнює 0,09 Ом.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

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. Перехідні процеси в системах електропостачання: підручник / Г.Г. Півняк, О.В. Кириленко, О.О. Азюковський, Ю.А. Папаїка, І.М. Луценко ; за ред. Г.Г. Півняка ; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – 6-те вид., доопрац. та допов. – Дніпро : НТУ «ДП», 2024. – 710 с.
4. Стійкість режиму енергосистеми з розподіленою генерацією: навчальний посібник / О.В. Кириленко, Г.Г. Півняк, О.О. Азюковський, Ю.А. Папаїка, І.М. Луценко ; за ред. Г.Г. Півняка ; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Дніпро: Грані, 2024. – 243 с.
5. Трансформація енергетики України в «інтелектуальну» ресурсно незалежну систему: навч. посіб. / О.В. Кириленко, Г.Г. Півняк, Ю.А. Папаїка, І.М. Луценко, О.Г. Лисенко; Нац. акад. наук України, М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка» — Дніпро: НТУ «ДП», 2023. — 56 с.
6. Електромагнітна сумісність у системах електропостачання: Підручник / І.В. Жежеленко, А.К. Шидловський, Г.Г. Півняк, Ю.Л. Саєнко. – Д.: Нац. гірнич. ун-т, 2009. – 319 с.: іл.
7. G. Pivnyak, O. Azukovskiy, Yu. Papaika, E. Careres Cabana, P. Olczak, A. Dyczko. ASSESSMENT OF POWER SUPPLY ENERGY EFFICIENCY BY VOLTAGE QUALITY CRITERION. *Rynek Energii*. 2021. № 4(155). С. 75-84.
8. Папаїка Ю.А. Проблеми електромагнітної сумісності потужних енергооб'єднань при масовому приєднанні відновлювальних джерел енергії / Ю.А. Папаїка, О.Г. Лисенко, А.В. Бубліков, І.Г. Олішевський // *Електроенергетика та електротехніка*. – 2021. – №1. – С. 34-45. [DOI 10.15588/1607-6761-2021-1-4](https://doi.org/10.15588/1607-6761-2021-1-4).
9. Папаїка Ю.А. Оцінка надійності систем електропостачання з потужними нелінійними навантаженнями / Ю.А. Папаїка, О.Г. Лисенко, А.В. Бубліков, І.Г. Олішевський // *Електроенергетика та електротехніка*. – 2020. – №4. – С. 26-33. [DOI 10.15588/1607-6761-2020-4-3](https://doi.org/10.15588/1607-6761-2020-4-3).
10. Pivniak H., Aziukovskyi O., Papaika Yu., Lutsenko I., Neuberger N. (2022). Problems of development of innovative power supply systems of Ukraine in the con-

text of European integration. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (5), 89-103. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-5/089>.

11. Національний стандарт України. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності. ДСТУ EN50160:2014.

12. Papaika, Yu.A., Lysenko, O.H., Koshelenko, Ye.V., Olishevskiy, I.H. (2021). Mathematical modeling of power supply reliability at low voltage quality. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2021, (2), pp. 97–103. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-2/097>.

13. ENTSO-E, ENTSO-G Overview of the selected /proposed gas and electricity TYNDP 2018 2040 story lines, 19 September 2016 / Entso-E. – 11 с. – (Препринт / ENTSO-E AISBL. Avenue de Cortenbergh 100, 1000 Brussels, Belgium). URL: [www.entsoe.eu](http://www.entsoe.eu).

14. Pivnyak G., Papaika Y., Aziukovskyi O., Lysenko O., Dluhopolskyi O. (2024). Ensuring sustainability of the power supply system of mining enterprises in the conditions of war risks. *E3S Web of Conferences*, 2024, 567, 01012. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202456701012>.

15. Transients in Electric Power Supply Systems. Textbook for institutions of higher education: under the editorship of G.G.Pivnyak / G.G.Pivnyak, I.V.Zhezhelenko, Y.A.Papaika; Ministry of Education and Science of Ukrainian, National Mining University - 5-th edition, revised and expanded: Translation from Ukrainian. - Trans Tech Publications Ltd, Switzerland, 2016. - 382 p.

16. Папаїка Ю.А. Енергетична ефективність систем електропостачання / Г.Г. Півняк, І.В. Жежеленко, Ю.А. Папаїка. – Д.: НТУ «ДП», 2018. – 149 с.

Упорядники:  
Папаїка Юрій Анатолійович

**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ  
ДО ВИКОНАННЯ ПРАКТИЧНИХ РОБІТ  
“ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ НАПРУГИ У  
СИСТЕМАХ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО  
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ”**

за навчальною дисципліною «Інтелектуальне електропостачання  
Smart Grid в системах розподіленої генерації»  
для студентів спеціальності  
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Національний технічний університет "Дніпровська політехніка"  
49027 м. Дніпро, пр. Д. Яворницького, 19.